

# **VÃOS ENVIDRAÇADOS, DESEMPENHO TÉRMICO E CONFORTO TÉRMICO HUMANO**

**Modelo Simplificado de Seleção**

**ANTÓNIO MANUEL FIGUEIREDO FREITAS DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida para obtenção do grau de  
Doutor em Engenharia Civil pela  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientadora: Maria Helena Póvoas Corvacho, Prof.<sup>a</sup> Associada da FEUP  
Coorientadora: Isabel Cristina da Silva Martins Ribeiro, Prof.<sup>a</sup> Auxiliar da FEUP

NOVEMBRO DE 2016

## **PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Programa Doutoral em Engenharia Civil - 2009/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.



À Ana-Cláudia,  
ao Dinis



## AGRADECIMENTOS

A minha primeira palavra de agradecimento vai para a minha esposa e para o meu filho pela compreensão das horas ausentes do convívio familiar, possibilitando a serenidade necessária para a conclusão deste trabalho.

Ao Presidente do Instituto Superior Politécnico de Viseu (IPV), por conceder uma Bolsa de Doutoramento no âmbito do programa PROFAD.

Ao Presidente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), por disponibilizar os espaços necessários para as campanhas experimentais de medição.

À Professora Doutora Maria Helena Povoas Corvacho por todo o apoio e disponibilidade, sempre com total empenho e dedicação, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

À Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins Ribeiro a forma pronta e disponível, sempre com total empenho e dedicação, como colaborou na realização da parte final deste trabalho e na leitura do texto, corrigindo-o e fazendo sugestões valiosas.

Aos colegas da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), em especial aos Doutores Ricardo Almeida e Luís Vasconcelos e à Arquiteta Cecília Moreno, pelos contributos que permitiram melhorar a qualidade do trabalho apresentado.

Aos técnicos do Laboratório de Física das Construções (LFC-FEUP) pelo apoio prestado na configuração dos equipamentos utilizados nas medições realizadas “*In Situ*”.

Por fim, a todos aqueles que direta ou indiretamente estiveram presentes e me acompanharam ao longo deste percurso, o meu sincero reconhecimento.



## RESUMO

Um dos grandes desafios que a humanidade tem de ultrapassar é a problemática das alterações climáticas e a degradação do meio ambiente. É do conhecimento de todos que estes desafios estão intimamente relacionados com o atual consumo de energia e formas de a obter. No setor da construção, um dos principais desafios é o aumento, por parte de população em geral, das exigências de conforto no interior das habitações, levando a um aumento na potência instalada dos equipamentos de aquecimento e arrefecimento, resultando num aumento do consumo energético e consequente impacto ambiental relativo à sua utilização. Ao mesmo tempo, organizações políticas e civis vêm desenvolvendo um papel significativo na busca da sustentabilidade, não só disseminando informações, incentivando o desenvolvimento de pesquisas, mas também implementando leis de redução do consumo energético.

Diversos estudos referem que cerca de 30 a 50% da energia primária a nível global é consumida por edifícios não industriais, tornando implícita a necessidade de inverter esses números.

O impacto ambiental dos edifícios, sejam eles novos ou existentes, pode ser minimizado com um projeto térmico em que todos os elementos da envolvente são criteriosamente selecionados, o que tem levado ao crescente desenvolvimento de ferramentas de simulação dinâmica do comportamento térmico de componentes dos edifícios e dos edifícios como um todo, revelam-se muitas vezes úteis nas decisões de projeto, particularmente na fase inicial.

Inserido neste contexto, com este trabalho pretende-se compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico da envolvente, na eficiência energética dos edifícios e no conforto térmico dos seus utilizadores. Os vãos envidraçados que permitem a entrada de energia solar e de luz natural são elementos responsáveis por ganhos indesejados de calor, encandeamento, e são também elementos perturbadores na obtenção de conforto térmico, quer devido a assimetrias radiantes quer devido a correntes de ar provenientes de infiltrações, em especial pelas caixas-de-estore. Estas perturbações são reconhecidas pelos utilizadores, tanto nos dias frios de inverno como nos dias mais quentes de verão.

Com o intuito de compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico dos edifícios e no conforto térmico dos ocupantes, tendo em vista, o desenvolvimento de um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados, foram caracterizadas as condições de conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados. O conhecimento das condições de conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados é essencial pois só dessa forma se poderá fazer uma análise aprofundada do efeito dos vãos envidraçados e, a partir daí, avançar para o segundo objetivo de uma forma sustentada em termos de opções adotadas.

Com a finalidade de modelar, validar com medições realizadas “*In Situ*” e aplicar o modelo de forma a ser possível comparar diferentes soluções construtivas em relação aos edifícios e aos vãos envidraçados e analisar as condições de conforto, foi utilizado o programa *DesignBuilder* como interface gráfica do programa *EnergyPlus*, ferramenta de simulação dinâmica multi-zona. Para conhecer e aplicar essa ferramenta foi feito um estudo do comportamento térmico a dois espaços de um edifício de serviços, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, ESTGV, aferindo sobre as condições de conforto térmico no centro dos espaços e nas zonas próximas dos vãos envidraçados (1,20 m do vão envidraçado), tendo em consideração a geometria dos espaços, a sua localização e a percentagem dos vãos envidraçados em relação à área de pavimento, a utilização de dispositivos de sombreamento e de proteção solar nos vãos envidraçados e a abertura dos mesmos, para as condições de verão, de inverno e meia estação

(outono e primavera). Para que o modelo simulado fosse uma representação mais exata da realidade, foi criado um ficheiro de dados climáticos anual.

Na parte final deste trabalho é apresentado um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados: pretende-se efetuar uma otimização de soluções construtivas tipo a aplicar em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vãos Envidraçados, Conforto Térmico, Eficiência Energética, Medições “*In Situ*”, Simulação Dinâmica, Modelo Simplificado de Seleção

## ABSTRACT

One of the biggest challenges humanity must overcome is the issue of climate change and environmental degradation. It is common knowledge that these challenges are closely related to the current energy consumption and ways to obtain it. In the construction sector, a key challenge is the increasing demands, by the general population, of indoor comfort, leading to heating and cooling extra power equipment, which results on a rise of energy consumption and consequent environmental impact on its use. At the same time, political and civil organizations have been developing a significant role in the search for sustainability, not only disseminating information, encouraging the development of research, but also implementing laws to reduce energy consumption.

Several statistics indicate that about 30 to 50% of global primary energy is consumed by non-industrial buildings, making it implicit the need to reverse those numbers.

Buildings environmental impact, whether new or old, can be minimized with a thermal project in which all the surrounding elements are carefully selected, which has led to increasing development of dynamic simulation tools of building components thermal behaviour and of buildings as a whole, which often reveals to be useful in design decisions, particularly at the initial phase.

Within this context, this work seeks to better understand the impact of glazed openings in the surrounding thermal performance, buildings energy efficiency and the thermal comfort of its users. The glazed openings, that allow solar energy entrance and natural light, are elements responsible for gains of unwanted heat, glare, and are also disturbing elements in achieving thermal comfort, either due to radiant asymmetry or due to draught risk from infiltration, especially through the shutter box. These disorders are recognized by users, both on winter cold days and on the hottest summer days.

In order to better understand the impact of the glazed areas, the thermal comfort conditions were characterized in the center of the spaces and in areas near the glazed areas. The knowledge of thermal comfort conditions in the center of the spaces and in areas near the glazed areas is essential as the only way one can make a thorough analysis of the effect of glazed areas and, from there, advance to the second goal in a sustainable way in terms of the options chosen.

In order to model, validate with measurements made "*In Situ*" and apply the model in order to compare different solutions of natural ventilation, solar factor of glazing openings and constitution of the constructive elements of the opaque surrounding and analyse the comfort conditions, the *DesignBuilder* program was used as an interface of the program *EnergyPlus*, dynamic simulation tool for multi-zone. To know and apply this tool, a study of the thermal behavior of the two spaces of a service building, a classroom and a technical office located in of Technology and Management School Viseu, ESTGV, checking on the conditions of thermal comfort in the center of the spaces and in areas near the glazed areas (1,20 meters will glassed), taking into account the geometry of space, its location and the percentage of glazed areas in relation to the floor area, the use of shading devices and solar protection in glazed areas and the opening thereof, for summer conditions, winter and mid-season (fall and spring). For the simulated model was a more accurate representation of reality, an annual climate data file was created.

In the final part of this work presents a Simplified Selection Model for the glazed areas: we intend to make an optimization of constructive type solutions to be applied in residential buildings and small office buildings.

**KEYWORDS:** Windows, Thermal Comfort, Energy Efficiency, "*In Situ*" Measurements, Dynamic Simulation, Simplified Model.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
 <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	 1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO DA TESE .....	1
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO .....	5
 <b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	 7
2.1. DESEMPENHO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS .....	7
2.1.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.1.2. IMPORTÂNCIA DA CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS .....	10
2.1.2.1. Introdução .....	10
2.1.2.2. Ganhos de Calor .....	11
2.1.2.3. Inércia Térmica .....	13
2.1.2.4. Distribuição de Calor .....	13
2.1.2.5. Conservação da Energia .....	14
2.1.3. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS .....	16
2.1.3.1. Introdução .....	16
2.1.3.2. Ferramentas Computacionais de Simulação .....	17
2.1.3.3. Programa EnergyPus .....	17
2.1.3.4. Programa DesignBuilder .....	19
2.2. CONFORTO TÉRMICO .....	20
2.2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE CONFORTO .....	20
2.2.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O CONFORTO TÉRMICO .....	22
2.2.3. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO .....	23
2.2.3.1. Considerações Gerais .....	23
2.2.3.2. Índices Analíticos .....	24
2.2.3.3. Modelos Adaptativos .....	26
2.2.3.4. Desconforto Local .....	34

2.2.3.5. Norma EN ISO 7 730 .....	36
2.2.3.6. Norma ASHRAE - 55 .....	38
2.2.3.7. Norma EN 15 251 .....	39
2.2.3.8. Modelo Proposto pelo LNEC .....	40
2.2.3.9. Legislação Nacional.....	41
<b>2.3. CARATERIZAÇÃO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS .....</b>	<b>43</b>
2.3.1. INTRODUÇÃO .....	43
2.3.2. CARATERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO VÃO ENVIDRAÇADO .....	44
2.3.3. COMPONENTES DO VÃO ENVIDRAÇADO .....	45
2.3.3.1. Elemento Translúcido ou Transparente .....	45
2.3.3.2. Caixilharia .....	47
2.3.3.3. Elementos Fixos do Vão Envidraçado.....	49
2.3.3.4. Dispositivos de Oclusão Noturna e de Proteção Solar.....	49
2.3.4. SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE VÃOS ENVIDRAÇADOS EXISTENTES OU EM DESENVOLVIMENTO.....	51
2.3.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS NO CONFORTO TÉRMICO.....	54
2.3.5.1. Introdução .....	54
2.3.5.2. Modelo de Conforto UCB.....	54
2.3.5.3. Outros Estudos .....	57
<b>3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	59
3.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA .....	59
3.3. DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS ESPAÇOS ANALISADOS E MEDIÇÕES EFETUADAS.....	60
3.3.1. DESCRIÇÃO GERAL DOS ESPAÇOS ANALISADOS.....	60
3.3.2. CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE.....	61
3.3.2.1. Caraterização da Envolvente Opaca .....	62
3.3.2.2. Caraterização dos Vãos Envidraçados .....	62
3.3.3. DESCRIÇÃO DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO .....	63
3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66
3.4.1. INTRODUÇÃO .....	66
3.4.2. TEMPERATURA DO AR .....	67
3.4.3. HUMIDADE RELATIVA.....	78
3.4.4. TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE E TEMPERATURA OPERATIVA .....	80

3.4.5. CARATERIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO .....	85
3.4.6. ASSIMETRIA DA TEMPERATURA RADIANTE.....	86
3.4.7. CONFORTO TÉRMICO .....	88
3.4.7.1. Introdução.....	88
3.4.7.2. Índices PMV e PPD .....	89
3.4.7.3. Método Gráfico Simplificado .....	93
3.4.7.4. Modelos Adaptativos .....	102
<b>3.5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>

## **4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....**

<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>123</b>
<b>4.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>123</b>
<b>4.3. DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS MODELOS DE EDIFÍCIOS .....</b>	<b>124</b>
4.3.1. MODELOS DA ESTGV .....	124
4.3.1.1. Introdução.....	124
4.3.1.2. Geometria .....	124
4.3.1.3. Elementos Construtivos.....	127
4.3.1.4. Ganhos Internos .....	127
4.3.1.5. Sistemas de Aquecimento e Ventilação.....	129
4.3.1.6. Dados Climáticos.....	129
4.3.1.7. Validação .....	133
4.3.2. MODELO DE EDIFÍCIO PARA O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO .....	135
4.3.2.1. Introdução.....	135
4.3.2.1. DESCRIÇÃO DO MODELO .....	135
<b>4.4. VARIÁVEIS EM ESTUDO .....</b>	<b>138</b>
4.4.1. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS .....	138
4.4.2. DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DAS VARIÁVEIS .....	142
4.4.2.1. Introdução .....	142
4.4.2.2. Variáveis Relacionadas com o Espaço a Simular .....	142
4.4.2.3. Variáveis Relacionadas com os Vãos Envidraçados .....	148
4.4.2.4. Variáveis Relacionadas com o Clima.....	150
4.4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE - PRELIMINAR.....	153
4.4.3.1. Introdução .....	153

4.4.3.2. Tipo de Vidro (V).....	153
4.4.3.3. Tipo de Caixilho (Cx) .....	156
4.4.3.4. Tipo de Proteção Solar (Ps) .....	158
4.4.3.5. Tipo de Ganhos Internos (Gi) .....	162
4.4.3.6. Tipo de Ventilação (Ra) .....	165
4.4.3.7. Conclusões .....	167
4.4.4. FUNÇÕES DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO.....	168
4.4.4.1. Introdução.....	168
4.4.4.2. Controlo da Temperatura Interior: Sem Climatização (Ctis) .....	169
4.4.4.3. Controlo da Temperatura Interior: Com Climatização (Ctic) .....	171
<b>4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>172</b>
4.5.1. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS.....	172
4.5.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	175
4.5.3. RESULTADOS DAS FUNÇÕES DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO .....	179
 <b>5. MODELO DE SELEÇÃO .....</b>	 <b>187</b>
<b>5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>187</b>
<b>5.2. OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>189</b>
5.2.1. INTRODUÇÃO .....	189
5.2.2. PROGRAMA CPLEX DA COLEÇÃO GAMS.....	190
5.2.3. PORGRAMA QLIKVIEW .....	192
5.2.3.1. Considerações Gerais Sobre o Programa QlikView .....	192
5.2.3.2. Apresentação e Análise de Resultados no Programa QlikView .....	193
<b>5.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS CARATERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS.....</b>	<b>194</b>
5.3.1. INTRODUÇÃO .....	194
5.3.2. RELAÇÃO $A_{ENV}/A_P$ (AE).....	195
5.3.3. SOMBREAMENTO POR ELEMENTOS EXTERIORES .....	198
5.3.4. TIPO DE CAIXILHO .....	202
5.3.5. TIPO DE VIDRO.....	205
5.3.6. CARATERÍSTICAS DO VIDRO .....	208
5.3.7. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO SOLAR.....	212
5.3.8. SÍNTESE DA ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	215

<b>5.4. MODELO DE SELEÇÃO</b> .....	217
5.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	217
5.4.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA UTILIZADA .....	218
5.4.2.1. Controlo da Temperatura Interior: Sem Climatização.....	218
5.4.2.2. Controlo da Temperatura Interior: Com Climatização .....	219
5.4.3. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE SELEÇÃO .....	220
5.4.3.1. Introdução .....	220
5.4.3.2. Modelo de Seleção: Sem climatização (Ctis_Modelo de Seleção) .....	222
5.4.3.3. Modelo de Seleção: Com climatização (Ctic_Modelo de Seleção) .....	226
5.4.3.4. Conclusões.....	233
 <b>6. CONCLUSÕES</b> .....	237
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	237
6.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS .....	238
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	241
 <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	243
 <b>Anexo A MÉTODO BESTTEST</b> .....	A.1
<b>Anexo B ELEMENTOS CONSTRUTIVOS</b> .....	B.1
<b>Anexo C RESULTADO DAS SIMULAÇÕES</b> .....	C.1
<b>Anexo D INTERFACE GRÁFICA – PROGRAMA QlikView</b> .....	D.1



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. - Evolução do consumo no setor doméstico (tep) e peso (%) do consumo do setor doméstico no consumo final total de energia, 1989-2009 [1] [2] .....	8
Fig.2.2. - Repartição do consumo de energia final por setor em 2009, adaptado de [2] .....	8
Fig.2.3. - Distribuição do consumo e da despesa com a energia no alojamento por tipo de utilização, respetivamente à esquerda e à direita, adaptado de [2] .....	8
Fig.2.4. - Distribuição do consumo de energia para aquecimento ambiente por tipo de fonte em Portugal, 2010, adaptado de [2] .....	8
Fig.2.5. - Balanço térmico de um edifício, adaptado de [17] .....	11
Fig.2.6. - Estrutura modular do programa EnergyPlus, adaptado de [30] [34] .....	18
Fig.2.7. – Programa EnergyPlus: módulos internos, adaptado de [34] .....	19
Fig.2.8. - Modelo de balanço térmico. a) superfície exterior; b) superfície interior; c) zona, adaptado de [30] [35] .....	19
Fig.2.9. - Interface gráfica do programa DesignBuilder .....	20
Fig. 2.10. - Interação térmica do corpo humano com o ambiente, adaptado de [4] .....	22
Fig. 2.11. - PPD em função de PMV, adaptado de [37] .....	25
Fig.2.12. - Posicionamento das sondas e dos transdutores de medição, adaptado de [4] .....	26
Fig. 2.13. - Efeito da oportunidade adaptativa, adaptado de [4] .....	27
Fig. 2.14. - Modelo adaptativo de conforto térmico, adaptado de [37] .....	28
Fig. 2.15. - Modelo adaptativo de conforto térmico, adaptado de [46] .....	29
Fig. 2.16. - Valor médio do factor de forma entre uma pessoa sentada e uma superfície horizontal ou vertical quando a pessoa pode ser rodada sobre um eixo vertical, adaptado de [66] .....	33
Fig. 2.17. - Velocidades do ar que permitem atenuar o efeito de temperaturas elevadas, adaptado de [37] .....	33
Fig. 2.18. - Pequeno elemento plano e superfícies paralelas .....	35
Fig. 2.19. - Pequeno elemento plano e superfícies perpendicular .....	35
Fig.2.20. - Temperatura operativa ideal para um ambiente de classe B, adaptado de [39] .....	37
Fig. 2.21. - Zona de conforto térmico (método gráfico simplificado), adaptado de [30] [37] .....	38
Fig. 2.22. - Modelo de conforto térmico adaptativo LNEC, adaptado de [4] .....	40
Fig. 2.23. - Diferentes funções do vão envidraçado, adaptado de [87] .....	43
Fig. 2.24. - Janela de PVC com vidro triplo [93] .....	45
Fig. 2.25. - Localização das proteções em relação ao envidraçado, adaptado de [37] .....	49
Fig.2.26. - Etiqueta do BFRC para classificação das janelas, adaptado de [97] .....	51
Fig. 2.27. - Etiqueta do NFRC para classificação das janelas, adaptado de [98] .....	52

Fig. 2.28. - Etiqueta proposta pela indústria da fenestração para classificação das janelas, adaptado de [100].....	53
Fig. 2.29. - Etiqueta energética da janela desenvolvida no âmbito do SEEP, adaptado de [101].....	53
Fig. 2.30. - Imagens do interface do modelo de conforto UCB [102] .....	55
Fig. 2.31. - Sensação global e os limites de conforto térmico – Modelo PMV vs Modelo UCB, adaptado de [102].....	56
Fig. 2.32. - Regressão linear entre a resistência térmica e a temperatura mínima exterior, adaptado de [102].....	56
Fig. 2.33. - Posicionamento das sondas e dos transdutores de medição dos parâmetros ambientais [57].....	57
Fig. 2.34. - Valores obtidos para dias de inverno, à esquerda sem dispositivo de proteção e à direita com estore veneziano [57].....	58
Fig. 2.35. - Células de teste e localização do equipamento de monitorização utilizado [108].....	58
Fig.3.1. - Planta dos espaços monitorizados: à esquerda a sala de aulas e à direita o gabinete .....	61
Fig.3.2. - Localização dos espaços monitorizados: em cima o edifício pedagógico (sala de aulas) em baixo o pavilhão da mecânica (gabinete).....	61
Fig.3.3. - Equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais .....	63
Fig.3.4. - Localização do equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais na sala de aulas.....	64
Fig.3.5. - Localização do equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais no gabinete.....	64
Fig.3.6. - Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica para o dia 14 de agosto de 2012, pelas 14 horas .....	66
Fig.3.7. - Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica dia 21 de agosto de 2012, pelas 16 horas .....	66
Fig.3.8. - Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica dia 05 de dezembro de 2012, pelas 14 horas.....	67
Fig.3.9. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (V1) para céu limpo, na sala de aulas .....	67
Fig.3.10. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (V1) para céu limpo, no gabinete .....	68
Fig.3.11. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (O1), na sala de aulas: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	68
Fig.3.12. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (O1), no gabinete: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	69
Fig.3.13. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), na sala de aulas para Céu limpo .....	69



Fig.3.14. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), na sala de aulas para Céu encoberto .....	70
Fig.3.15. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	70
Fig.3.16. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), na sala de aulas: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	71
Fig.3.17. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), no gabinete para Céu limpo.....	71
Fig.3.18. - Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), no gabinete para Céu encoberto .....	72
Fig.3.19. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Verão (V) para Céu limpo, à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão .....	75
Fig.3.20. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Verão (V) para Céu limpo, à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão .....	75
Fig.3.21. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Outono (O), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	75
Fig.3.22. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Outono (O), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	76
Fig.3.23. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Inverno (I), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	76
Fig.3.24. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Inverno (I), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	77
Fig.3.25. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Primavera (P), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto ..	77
Fig.3.26. - Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Primavera (P), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	78
Fig.3.27. - Variação da humidade relativa para a situação com os vãos com o estore 100% ativado com as lâminas na posição horizontal e janela oscilo-batente com o modo basculante aberto (V4) para céu limpo, à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete.....	78
Fig.3.28. - Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (O5), à esquerda na sala de aulas com ocupação e à direita no gabinete sem ocupação. a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	79
Fig.3.29. - Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com aquecimento (I2), à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	80
Fig.3.30. - Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com janela oscilo-batente com o modo basculante aberto (P5), à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	80

Fig.3.31. - Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculadas no centro da sala de aulas e a 1,20 m do vão e medidas a 1,20 m do vão no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (V1) .....	81
Fig.3.32. - Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculada para os vãos com o estore 0% ativado (O1), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão. a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	82
Fig.3.33. - Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculada para os vãos com o estore 0% ativado (I1), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão. a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	82
Fig.3.34. - Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculada para os vãos com o estore 0% ativado (P1), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão. a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	83
Fig.3.35. - Correlação entre a temperatura do ar e a temperatura operativa na sala de aulas, no centro e a 1,20 m do vão durante a campanha de verão .....	84
Fig.3.36. - Correlação entre a temperatura do ar e a temperatura operativa a 1,20 m do vão durante a campanha de inverno .....	85
Fig.3.37. - Resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para a sala de aulas .....	85
Fig.3.38. - Resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para o gabinete .....	86
Fig.3.39. - Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (V1) no centro e a 1,20 m do vão, à esquerda calculada para a sala e à esquerda medida no gabinete .....	87
Fig.3.40. - Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (O1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto .....	87
Fig.3.41. - Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (I1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto .....	87
Fig.3.42. - Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com aquecimento (I2) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto .....	88
Fig.3.43. - Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (P1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto. ....	88
Fig.3.44. - Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Verão (V1): a) sala de aulas; b) gabinete .....	89
Fig.3.45. - Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Outono (O1) no centro do gabinete e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	90
Fig.3.46. - Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Inverno (I1) no centro do gabinete a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	91
Fig.3.47. - Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Primavera (P1) no gabinete: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	92

Fig.3.48. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V1) para o centro e a 120 m do vão: a) Sala de aulas; b) Gabinete.....	94
Fig.3.49. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V) para o centro da sala de aulas e a 120 m do vão .....	95
Fig.3.50. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V) para o centro do gabinete e a 120 m do vão.....	95
Fig.3.51. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Outono (O1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	97
Fig.3.52. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico durante a Campanha de inverno (I1) (I1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	98
Fig.3.53. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Inverno (I) para o centro da sala de aulas e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	99
Fig.3.54. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Inverno (I) para o centro do gabinete e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	100
Fig.3.55. - Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Primavera (P1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto.....	102
Fig.3.56. - Avaliação do conforto térmico por aplicação de modelos adaptativos, durante a Campanha de Verão (V1), para céu limpo: modelo da ASHRAE 55; b) Modelo da EN 15 251 .....	103
Fig.3.57. - Avaliação do conforto térmico por aplicação de modelos adaptativos, durante a Campanha de Verão (V1), para céu limpo: a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC .....	104
Fig.3.58. - Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos a Campanha de Verão (V) para o centro e a 120 m do vão: a) modelo da ASHRAE 55; b) Modelo da EN 15 251.....	105
Fig.3.59. - Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo a Campanha de Verão (V) para o centro e a 120 m do vão: modelo do LNEC.....	106
Fig.3.60. - Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Outono (O1): a) modelo da ASHRAE 55; b) Modelo da EN 15 251 .....	107
Fig.3.61. - Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Outono (O1): modelo do LNEC .....	108
Fig.3.62. - Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos a Campanha de Outono (O) para o centro e a 120 m do vão: modelo da ASHRAE 55..	108
Fig.3.63. - Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo a Campanha de Outono (O) para o centro e a 120 m do vão: a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC .....	109
Fig.3.64. - Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Inverno (I1), para céu limpo: modelo da ASHRAE 55.....	110
Fig.3.65. - Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Inverno (I1): a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC .....	111

Fig.3.66. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo modelo da EN 15 251 durante a Campanha de Inverno (I) para o centro e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	112
Fig.3.67. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Inverno (I) para o centro e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto .....	113
Fig.3.68.- Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Primavera (P1), para céu limpo: a) modelo da ASHRAE 55; b) Modelo da EN 15 251 .....	115
Fig.3.69. - Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Primavera (P1), para céu limpo: modelo do LNEC .....	116
Fig.3.70. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pela EN 15 251 durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu limpo .....	116
Fig.3.71. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pela EN 15 251 durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu encoberto .....	117
Fig.3.72. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu limpo .....	117
Fig.3.73. - Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu encoberto .....	118
Fig.4.1. - Modelo criado para o edifício pedagógico e pavilhão oficial .....	125
Fig.4.2. - Modelo criado para o edifício pedagógico: a) vista exterior; b) planta do 1.º piso; c) planta do 2.º piso .....	126
Fig.4.3. - Modelo criado para o pavilhão oficial: a) vista exterior; b) planta do 1.º piso; c) planta do 2.º piso .....	126
Fig.4.4. - Perfil de funcionamento da iluminação .....	128
Fig.4.5. - Dados Climáticos medidos para Viseu .....	132
Fig.4.6. - Comparação entre os resultados da simulação e da medição, durante a Campanha de Verão para a condição (V1): à esquerda para a sala de aulas e à direita para o gabinete .....	134
Fig.4.7. - Comparação entre os resultados da simulação e da medição, durante a Campanha de Inverno para a condição (I1): à esquerda para a sala de aulas e à direita para o gabinete .....	134
Fig.4.8. - Modelo do Edifício .....	135
Fig.4.9. - Edifício Modelo – Orientação dos vãos envidraçados (Norte, Este, Sul, Oeste) .....	136
Fig.4.10. - Piso 0 – Sobre o Solo, Espaços: A.0, B.0, C.0 e D.0 com a envolvente interior adiabática .....	137
Fig.4.11. - Piso 1 – Nível Intermédio, Espaços: A.1, B.1, C.1 e D.1 com a envolvente interior adiabática .....	137
Fig.4.12. - Piso 2 – Sob a Cobertura, Espaços: A.2, B.2, C.2 e D.2 com a envolvente interior adiabática. ....	137
Fig.4.13. - Localização dos elementos exteriores de sombreamento: à esquerda as palas laterais e à direita a pala horizontal .....	146

Fig.4.14. - Determinação das propriedades dos vãos envidraçados utilizando o programa WINDOW [112].....	148
Fig.4.15. - Localização geográfica dos edifícios .....	151
Fig.4.16. - Dados Climáticos para Bragança .....	151
Fig.4.17. - Dados Climáticos para o Porto .....	151
Fig.4.18. - Dados Climáticos para Évora .....	151
Fig.4.19. - Comparação anual da variação média diária da temperatura do ar no espaço (A.1), para vários tipos de vidro .....	154
Fig.4.20. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), para vários tipos de vidro.....	154
Fig.4.21. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), para vários tipos de vidro.....	154
Fig.4.22. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V1 à esquerda e vidro V2 à direita .....	155
Fig.4.23. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V3 à esquerda e vidro V4 à direita .....	155
Fig.4.24. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V5 .....	155
Fig.4.25. - Comparação anual da variação média diária da temperatura do ar no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho .....	156
Fig.4.26. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho .....	157
Fig.4.27. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho .....	157
Fig.4.28. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: caixilho Cx1 à esquerda e o caixilho Cx2 à direita .....	158
Fig.4.29. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: caixilho Cx3 à esquerda e o caixilho Cx4 à direita .....	158
Fig.4.30. - Comparação anual da variação média diária da temperatura do ar no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar .....	159
Fig.4.31. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar .....	160
Fig.4.32. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar .....	160
Fig.4.33. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps1 à esquerda e proteção solar Ps2 à direita .....	160
Fig.4.34. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps3 à esquerda e proteção solar Ps4 à direita .....	161

Fig.4.35. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps5 à esquerda e proteção solar Ps6 à direita .....	161
Fig.4.36. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps7.....	161
Fig.4.37. - Comparação anual da variação média diária da temperatura do ar no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos .....	163
Fig.4.38. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos.....	163
Fig.4.39. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos.....	163
Fig.4.40. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi1 à esquerda e o ganho interno Gi2 à direita .....	164
Fig.4.41. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi3 à esquerda e o ganho interno Gi4 à direita .....	164
Fig.4.42. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi5 à esquerda e o ganho interno Gi6 à direita .....	164
Fig.4.43. - Comparação anual da variação média diária da temperatura do ar no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação.....	165
Fig.4.44. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação .....	166
Fig.4.45. - Comparação da variação média diária da temperatura do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação .....	166
Fig.4.46. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra1 à esquerda e ventilação Ra2 à direita.....	166
Fig.4.47. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra3 à esquerda e ventilação Ra4 à direita.....	166
Fig.4.48. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra5 à esquerda e ventilação Ra6 à direita.....	167
Fig.4.49. - Análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra7 .....	167
Fig.4.50. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $C_{tis\_GHD_i}^{(Ta<18)}$ em Bragança .....	180
Fig.4.51. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $C_{tis\_GHD_i}^{(Ta<18)}$ em Évora.....	181
Fig.4.52. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $C_{tis\_GHD_i}^{(Ta<18)}$ no Porto .....	181
Fig.4.53. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $C_{tis\_GHD_v}^{(Ta>25)}$ em Bragança .....	182

Fig.4.54. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ em Évora .....	182
Fig.4.55. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ no Porto .....	182
Fig.4.56. - Resultados obtidos para a Função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ em Bragança .....	183
Fig.4.57. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ em Évora .....	183
Fig.4.58. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ no Porto .....	184
Fig.4.59. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$ em Bragança .....	184
Fig.4.60. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$ em Évora .....	185
Fig.4.61. - Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$ no Porto .....	185
Fig.5.1. - Apresentação da análise dos resultados obtidos no programa QlikView: à esquerda as características e as respetivas opções (não selecionadas) e à direita a apresentação gráfica dos resultados .....	192
Fig.5.2. - Características do Espaço com as opções selecionadas .....	195
Fig.5.3. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência da Ae, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul .....	195
Fig.5.4. - Análise paramétrica da influência da Ae para as funções $Ctis\_GHD\_Ta$ e $Ctis\_GHD\_Tmr$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul .....	196
Fig.5.5. - Análise paramétrica da influência da Ae para as funções $Ctis\_GHD\_Ta$ e $Ctis\_GHD\_Tmr$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	196
Fig.5.6. - Análise paramétrica da influência da Ae para as funções $Ctic\_N_{ic}$ e $Ctic\_N_{vc}$ em função da orientação dos vãos envidraçados .....	197
Fig.5.7. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul .....	199
Fig.5.8. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções $Ctis\_GHD\_Ta$ e $Ctis\_GHD\_Tmr$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul .....	199
Fig.5.9. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções $Ctis\_GHD\_Ta$ e $Ctis\_GHD\_Tmr$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	200
Fig.5.10. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções $Ctic\_N_{ic}$ e $Ctic\_N_{vc}$ em função da orientação dos vãos envidraçados .....	200

Fig.5.11. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	202
Fig.5.12. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	203
Fig.5.13. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	203
Fig.5.14. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções Ctic_N <sub>ic</sub> e Ctic_N <sub>vc</sub> em função da orientação dos vãos envidraçados .....	204
Fig.5.15. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul .....	205
Fig.5.16. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	206
Fig.5.17. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	206
Fig.5.18. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctic_N <sub>ic</sub> e Ctic_N <sub>vc</sub> em função da orientação dos vãos envidraçados .....	207
Fig.5.19. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência das Características do Vidro, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	209
Fig.5.20. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	209
Fig.5.21. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	210
Fig.5.22. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro para as funções Ctic_N <sub>ic</sub> e Ctic_N <sub>vc</sub> em função da orientação dos vãos envidraçados .....	210
Fig.5.23. - Opções selecionadas relativas às características do espaço e às características do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	212
Fig.5.24. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul.....	213
Fig.5.25. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctis_GHD-Ta e Ctis_GHD_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste .....	213
Fig.5.26. - Análise paramétrica da influência aos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctic_N <sub>ic</sub> e Ctic_N <sub>vc</sub> em função da orientação dos vãos envidraçados .....	214
Fig.5.27. - Interface gráfica do Modelo de Seleção. Sem Climatização (Ctis_Modelo de Seleção)...	221



Fig.5.28. - Interface gráfica do Modelo de Seleção. Com Climatização (Ctic_Modelo de Seleção) ...	222
Fig.5.29. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae).....	223
Fig.5.30. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro .....	224
Fig.5.31. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores.....	224
Fig.5.32. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar .....	225
Fig.5.33. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro .....	225
Fig.5.34. - Modelo de Seleção (Ctis_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro, Tipo de Caixilho.....	226
Fig.5.35. - Ctis_Modelo de Seleção: características do vão envidraçado, com as opções selecionadas.....	226
Fig.5.36. - Ctis: Resultado obtido com a utilização do programa cplex da coleção GAMS.....	227
Fig.5.37. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae).....	228
Fig.5.38. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro .....	229
Fig.5.39. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores.....	229
Fig.5.40. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar .....	230
Fig.5.41. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro .....	230
Fig.5.42. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação $A_{env}/A_p$ (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro, Tipo de Caixilho.....	231

Fig.5.43. - Ctic_Modelo de Seleção: Caraterísticas do vão envidraçado, com as opções selecionadas.....	232
Fig.5.44. - Ctic: Resultado obtido com a utilização do programa cplex da coleção GAMS .....	232
Fig.5.45. - Ctis_Modelo de Seleção: NHD $( T_a - T_s  > 5)$ .....	233
Fig.5.46. - Ctic_Modelo de Seleção: NHD $( T_a - T_s  > 5)$ .....	234
Fig.5.47. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), para Évora .....	234
Fig.5.48. - Modelo de Seleção (Ctic_Modelo de Seleção), para o Porto .....	235

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. - Escala de sensação térmica, adaptado de [37] .....	25
Quadro 2.2. - Gama de temperaturas aceitáveis para cada categoria de ambiente térmico, adaptado de [46] [54].....	30
Quadro 2.3. - Valores mínimos e máximos para a temperatura de conforto calculadas de acordo com o modelo adaptativo do projeto SCATs, adaptado de [56] .....	31
Quadro 2.4. - Intervalos de variação dos parâmetros intervenientes no cálculo de PMV [39] .....	36
Quadro 2.5. - Ambientes térmicos e respetivas exigências [40].....	36
Quadro 2.6. - Principais propriedades do vidro [91].....	46
Quadro 2.7. - Propriedades térmicas, lumínicas e acústicas de vários tipos de vidro [92] .....	47
Quadro 2.8. - Propriedades mais importantes dos materiais mais utilizados em caixilharia [87] .....	48
Quadro 2.9. - Elementos fixos do vão envidraçado: Propriedades dos materiais mais utilizados [87] .....	49
Quadro 2.10. - Características relevantes dos três materiais utilizados nos dispositivos de oclusão noturna e proteção solar dos vãos envidraçados [93] .....	50
Quadro 3.1. - Características gerais dos espaços em estudo .....	60
Quadro 3.2. - Caracterização da envolvente opaca .....	62
Quadro 3.3. - Constituição dos vãos envidraçados .....	63
Quadro 3.4. - Períodos e condições de medição no 1.º Ano .....	65
Quadro 3.5. - Períodos e condições de medição no 2.º Ano .....	65
Quadro 3.6. - Análise estatística do registo da temperatura do ar registada no 1.º Ano .....	73
Quadro 3.7. - Análise estatística do registo da temperatura do ar registada no 2.º Ano .....	73
Quadro 3.8. - Análise estatística da temperatura superficial no centro do vidro, da temperatura média radiante e da temperatura operativa registadas no 1.º Ano .....	83
Quadro 3.9. - Análise estatística da temperatura superficial no centro do vidro, da temperatura média radiante e da temperatura operativa registadas no 2.º Ano .....	84
Quadro 3.10. - Condições de medição para a ventilação .....	85
Quadro 3.11. - Caudais de ventilação.....	86
Quadro 3.12. - Análise estatística dos Índices PMV e PPD, registadas no 1.º Ano .....	93
Quadro 3.13. - Análise estatística dos Índices PMV e PPD, registadas no 2.º Ano .....	93
Quadro 4.1. - Dados para a contabilização da atividade metabólica .....	128
Quadro 4.2. - Dados para a contabilização dos ganhos internos devidos aos equipamentos .....	129
Quadro 4.3. - Programação do aquecimento central .....	129
Quadro 4.4. - Esquema geral das variáveis relacionadas com os vãos envidraçados .....	139
Quadro 4.5. - Esquema geral das variáveis relacionadas com o espaço a simular .....	140

Quadro 4.6. - Esquema geral das variáveis relacionadas com o sombreamento e geometria do vão envidraçado .....	141
Quadro 4.7. - Esquema geral das variáveis relacionadas com a localização geográfica do edifício e do espaço a simular no edifício .....	141
Quadro 4.8. - Relação entre a área do vão envidraçado e a área de pavimento (comprimento x altura) em função da profundidade .....	142
Quadro 4.9. - Síntese com o coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente.....	143
Quadro 4.10. - Constituição dos elementos construtivos para a inércia térmica forte (F) .....	144
Quadro 4.11. - Constituição dos elementos construtivos para inércia térmica fraca (f) .....	145
Quadro 4.12. - Dados para a contabilização da atividade metabólica .....	147
Quadro 4.13. - Dados para a contabilização dos ganhos pela iluminação .....	147
Quadro 4.14. - Caraterísticas do vidro utilizados nas simulações .....	149
Quadro 4.15. - Tipo de caixilharia (Personalizada no DesignBuilder) .....	150
Quadro 4.16. - Tipo de estore (definido no programa DesignBuilder de acordo com o REH [8]).....	150
Quadro 4.17. - Valores mensais da temperatura do solo a 0,5 m e a 2,0 m de profundidade .....	152
Quadro 4.18. - Estação de arrefecimento e de aquecimento para os climas estudados .....	152
Quadro 4.19. - Caraterísticas do vidro .....	153
Quadro 4.20. - Caraterísticas do caixilho .....	156
Quadro 4.21. - Caraterísticas dos dispositivos de proteção solar definido no DesignBuilder de acordo com o REH .....	159
Quadro 4.22. - Caraterização dos ganhos internos .....	162
Quadro 4.23. - Caraterização da ventilação.....	165
Quadro 4.24. - Códigos utilizados nas funções de avaliação do desempenho .....	168
Quadro 4.25. - Estrutura Geral do Estudo.....	173
Quadro 4.26. - Identificação das Combinações de 1 a 192 .....	174
Quadro 5.1. - Análise paramétrica da influência da Ae em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização .....	198
Quadro 5.2. - Análise paramétrica da influência da Ae em função da orientação do vão envidraçado, com climatização .....	198
Quadro 5.3. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização.....	201
Quadro 5.4. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores em função da orientação do vão envidraçado, com climatização.....	201
Quadro 5.5. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização .....	204

Quadro 5.6. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho em função da orientação do vão envidraçado, com climatização .....	205
Quadro 5.7. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização .....	208
Quadro 5.8. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro em função da orientação do vão envidraçado, com climatização .....	208
Quadro 5.9. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização .....	211
Quadro 5.10. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro em função da orientação do vão envidraçado, com climatização .....	211
Quadro 5.11. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização .....	215
Quadro 5.12. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar em função da orientação do vão envidraçado, com climatização .....	215
Quadro 5.13. - Análise de importância das características dos vãos envidraçados, sem climatização .....	216
Quadro 5.14. - Análise de importância das características dos vãos envidraçados, com climatização .....	216



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

% - Percentagem

$\alpha$  - Coeficiente de Dilatação Térmica Linear [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

A, B, C e D – Espaços do Edifício

ACA - Adaptive Control Algorithm

ADENE – Agencia para a Energia

$A_{\text{env}}/A_p$  ( $A_e$ ) - Relação entre a Área Envidraçada e a Área de Pavimento [%]

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BESest - Building Energy Simulation test

BI - Business Intelligence

BLAST - Building Loads analysis and System Thermodynamics

BRFC - British Fenestration Rating Council

CBE - Center for the Built Environment, EUA

CE - Comunidade Europeia

$\text{CO}_2$  – Dióxido de Carbono

COMIS - An International Multizone Airflow and Contaminant Transport Model

COP – Coeficiente de Desempenho Energético

$C_p$  - Calor Específico [ $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]

CR - Condensation Resistance [%]

CSV - Ficheiro Separado por Vírgulas

CTF - Conduction Transfer Functions

Ctic - Controlo da Temperatura Interior: Com climatização

Ctis - Controlo da Temperatura Interior: Sem climatização

Cx – Tipo de Caixilho

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

$\Delta p$  - Diferença de Pressão [Pa]

DPI - Densidade de Potencia de Iluminação [ $(\text{W/m}^2)/100\text{lux}$ ]

DR - Risco de Corrente de Ar (Draught risk) [%]

$\Delta T$  - Diferença de Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$  ou K]

e - Espessura do Material [m]

E - Módulo de Young [GPa]

EI - Espessura do Isolamento Térmico dos Elementos da Envolvente Exterior

EPS - Poliestireno Expandido Moldado

EPW – EnergyPlus Weather

ESTGV - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

EUA – Estados Unidos da América

EWERS – European Window Energy Rating System

F – Inércia Térmica Forte

f - Inércia Térmica Fraca

Fg – Fração Envidraçada

F<sub>p-i</sub> - Fator de Forma entre a Pessoa e a Superfície i

G - Gabinete

g<sub>⊥vi</sub> - Fator Solar do Vidro [ - ]

GEE - Gases do Efeito Estufa

GHD – Graus-hora de Desconforto [°C.h]

Gi – Ganhos Internos (ocupação, equipamentos e iluminação)

g<sub>T</sub> - Fator Solar de um Vão Envidraçado [ - ]

GUI - Graphical User Interface

h - Altura Solar

HB - Heat Balance Method

HR - Humidade Relativa do Ar [%]

I - Campanha de Inverno

I<sub>2</sub> – Zona Climática de Inverno - 2

IAE – Agência Internacional de Energia

I<sub>cl</sub> - Resistência Térmica Convencional do Vestuário [clo]

I<sub>cs</sub> – Constante Solar [W/m<sup>2</sup>]

IDF – Ficheiro de dados do programa EnergyPlus

I<sub>dh</sub> - Intensidade Radiação Solar Difusa Horizontal [W/m<sup>2</sup>]

IEA – International Energy Agency

I<sub>gh</sub> - Intensidade da Radiação Global Horizontal [W/m<sup>2</sup>]

I<sub>i</sub> - Intensidade da Radiação Solar Direta em Superfície Normal [W/m<sup>2</sup>]

INE - Instituto Nacional de Estatística

I<sub>t</sub> - Inércia Térmica

ITE – Informação Técnica de Edifícios



ITeCons - Instituto de Investigação de Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

IWEC - International Weather for Energy Calculations

$\lambda$  - Condutibilidade Térmica [W/m.°C ou W/m.K]

L / D – Aquecimento no Espaço Ligado (L) ou Desligado (D)

LBNL - Lawrence Berkeley National Laboratory

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Low  $\varepsilon$  - Capa de Baixa Emissividade

M - Atividade Metabólica [met]

m<sup>2</sup> – Metro Quadrado

N, E, NE, S, SW, W, NW – Pontos Cardiais

NFRC- National Fenestration Rating Council Incorporated, EUA

NHD – Número de Horas com Desconforto [h]

$N_{ic}$  - Necessidade Nominal de Energia Útil para aquecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

NIST – National Institute of Standards and Technology

$N_{tc}$  - Necessidade Nominal Anuais Globais de Energia Primária [kWhEP/m<sup>2</sup>.ano]

$N_{vc}$  - Necessidade Nominal de Energia Útil para arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

O - Campanha de Outono

P - Campanha de Primavera

$p_a$  - pressão parcial do vapor de água [Pa]

Pd – Pé-direito [m]

PD – Percentagem de Desconforto [%]

PMV – Voto Médio Previsível [ - ]

PPD – Percentagem Previsível de Insatisfeitos [%]

Prof. - Profundidade, Distância entre a Fachada (onde está inserida o vão) e a Parede Oposta

PS - Dispositivo de Proteção Solar

PVC - Policloreto de Vinil

q - Fluxo de Calor [W/m<sup>2</sup>]

R – Correlação Linear de Pearson

$\rho$  - Massa Volúmica ou Densidade [kg/m<sup>3</sup>]

R – Resistência Térmica do Elemento de Construção [m<sup>2</sup>.°C/W]

Ra – Permeabilidade/Renovações Horárias do Ar [h<sup>-1</sup>]

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico

RECS - Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

$R_{ph}$  - Renovação de Ar por Hora [ $h^{-1}$ ]

RQSECE - Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios

$R_r$  - Resistência Térmica da Roupas [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios

RTA - Assimetria da Temperatura Radiante [ $^\circ C$ ]

$R_w$  - Isolamentos Acústicos aos Sons Aéreos [dB]

S - Sala de Aulas

SCATS Project – Smart Controls and Thermal Comfort

SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

SEEP - Sistema de Etiquetagem Energética de Produtos

SEh - Sombreamento dos Elementos Exteriores Horizontais

SEs – Sem Sombreamento por Elementos Exteriores

SEv - Sombreamento dos Elementos Exteriores Verticais

SHGC - Solar Heat Gain Coefficient [ - ]

$T_a$  - Temperatura do Ar Ambiente [ $^\circ C$ ]

$T_{conf}$  - Temperatura Operativa de Conforto [ $^\circ C$ ]

tep - Tonelada Equivalente de Petróleo

$T_i$  - Temperatura da Superfície i [ $^\circ C$ ]

TIMs - Transparent ou Translucent Insulating Material

$T_m$  - Temperatura Exterior Média Mensal [ $^\circ C$ ]

$T_{mp}$  - Temperatura Exterior Média Exponencialmente Ponderada dos Últimos 7 Dias [ $^\circ C$ ]

$T_{mr}$  - Temperatura Média Radiante [ $^\circ C$ ]

$T_{n-i}$  - Temperatura Exterior Média do Dia (i) Anterior [ $^\circ C$ ]

$T_{oc}$  - Temperatura Operativa de Conforto [ $^\circ C$ ]

$T_{op}$  - Temperatura Operativa [ $^\circ C$ ]

$T_{s-Parede Corredor}$  - Temperatura Superficial na Parede do Corredor [ $^\circ C$ ]

$T_{s-Vidro}$  - Temperatura Superficial no Centro do Vidro [ $^\circ C$ ]

TWINS — Testing Window Innovative System

$U$  - Coeficiente de Transmissão Térmica [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$  ou  $W/m^2 \cdot K$ ]

UCB - Berkeley Comfort Model

UE – União Europeia

$U_w$  - Coeficiente de Transmissão Térmica dos Vãos Envidraçados [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$U_{\text{wdn}}$  - Coeficiente de Transmissão Térmica Médio Dia-Noite dos Vãos Envidraçados [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

V – Campanha de Verão

$V_2$  – Zona Climática de Verão - 2

$v_a$  - Velocidade do Ar [ $\text{m}/\text{s}$ ]

Vd – Vidro Duplo

VT – Visible Transmittance [ - ]

W - Watt

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO DA TESE

Um dos grandes desafios que a humanidade tem de ultrapassar é a problemática das alterações climáticas e a degradação do meio ambiente. É do conhecimento de todos que estes desafios estão intimamente relacionados com o atual consumo de energia e formas de a obter. No setor da construção, um dos principais desafios é o aumento, por parte da população em geral, das exigências de conforto no interior dos edifícios, levando a um aumento na potência instalada dos equipamentos de aquecimento e arrefecimento (de climatização), resultando num aumento do consumo energético e consequente impacto ambiental relativo à sua utilização. Ao mesmo tempo, organizações políticas e civis vêm desenvolvendo um papel significativo na busca da sustentabilidade, não só disseminando informações, incentivando o desenvolvimento de pesquisas, mas também implementando leis de redução do consumo energético.

Diversos dados estatísticos referem que cerca de 30 a 50% da energia primária a nível global é consumida por edifícios não industriais, tornando implícita a necessidade de inverter esses números [1] [2].

Num projeto recente (*SCATs project*) [3] concluiu-se que a variação da temperatura interior não aumenta o desconforto nos ocupantes, mas reduz significativamente o consumo de energia para climatização, quando comparado com a utilização de uma temperatura interior constante. Sugere-se então, que o uso de um sistema de controlo que permita que a temperatura de referência mude moderadamente em função da temperatura exterior não causa desconforto nos ocupantes, comparando com uma temperatura de referência constante, mas que poderá resultar em ganhos substanciais na utilização da energia.

Torna-se cada vez mais imperativo investir na melhoria das características de comportamento térmico dos elementos que constituem a envolvente do edifício, principalmente numa perspetiva de captação e conservação de energia, mas também de permitir o reforço de numerosas vantagens (maior durabilidade da construção e uma maior estanquidade do edifício), e ainda de promover o uso de tecnologias de baixo custo energético, tais como soluções de aquecimento e arrefecimento passivo sem descuidar o conforto térmico dos seus utilizadores [4] e [5].

A utilização da radiação solar para aquecer os edifícios está a aumentar nos últimos anos para reduzir a utilização dos combustíveis fósseis e, por sua vez, para restringir a pressão exercida pelas atividades humanas sobre o meio ambiente [6]. A Diretiva 2010/31/EU [7] relativa ao desempenho energético dos edifícios incentiva a utilização de fontes de energia renováveis, e a radiação solar está entre elas, na climatização de edifícios.

O enquadramento legislativo do uso de energia em edifícios, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) [8] pretende assegurar que as exigências de conforto térmico, sejam de aquecimento ou arrefecimento, de ventilação ou de necessidade de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem gastos excessivos de energia.

O impacto ambiental dos edifícios, sejam eles novos ou existentes, pode ser minimizado com um projeto térmico em que todos os elementos da envolvente são criteriosamente selecionados, de forma, a otimizar a utilização da radiação solar e a minimizar as perdas térmicas no Inverno.

A preocupação com a seleção e otimização dos elementos da envolvente e dos sistemas de climatização e iluminação, tem levado ao crescente desenvolvimento de ferramentas de simulação do comportamento térmico de componentes dos edifícios e de edifícios como um todo. Este tipo de ferramentas de simulação dinâmica permite prever temperaturas interiores, carga térmica, consumos de energia, níveis de conforto, fluxos de calor nos elementos da envolvente, níveis de iluminação, caudais de infiltração e ventilação natural, etc. Estas previsões, que podem ser efetuadas para um ano típico de clima local ou para as condições climáticas reais durante um determinado período de tempo, revelam-se muitas vezes úteis nas decisões de projeto, particularmente na fase inicial. As decisões tomadas nas fases iniciais do projeto têm um custo menor e frequentemente têm um impacto maior no desempenho do edifício [9].

O programa *EnergyPlus* [10] é um programa de simulação térmica e energética de edifícios, que possibilita desenvolver estudos no sentido da melhoria da eficiência energética de um edifício em fase de projeto ou ainda, de edifícios existentes. Este programa é atualmente utilizado em Portugal na aplicação do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [8], na verificação dos consumos energéticos de grandes edifícios com sistemas de climatização, utilizando como interface gráfica o programa *DesingBuilder* [11].

Inserido neste contexto, com este trabalho pretende-se compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico da envolvente, na eficiência energética dos edifícios e no conforto térmico dos seus utilizadores. Os vãos envidraçados que permitem a entrada de energia solar e de luz natural são elementos responsáveis por ganhos (perdas) indesejados de calor, encandeamento, e são também elementos perturbadores na obtenção de conforto térmico, quer devido a assimetrias radiantes quer devido a correntes de ar provenientes de infiltrações, mas também pelas caixas-de-estore [12]. Estas perturbações são reconhecidas pelos utilizadores, tanto nos dias frios de Inverno como nos dias mais quentes de Verão.

Como resultado de novas expressões arquitetónicas e certos avanços tecnológicos, os vãos envidraçados ganham cada vez maior destaque na arquitetura atual. A seleção fundamentada dos vãos envidraçados para a envolvente dos edifícios carece de um conhecimento aprofundado do desempenho das soluções possíveis (vidro, caixilho, dispositivos de proteção solar, área envidraçada, etc.) tendo em consideração as características relacionadas com os vãos envidraçados e com os edifícios onde se inserem. Salientam-se as seguintes características:

1 . As características dos vãos envidraçados:

- Coeficiente de transmissão térmica do vidro;
- Coeficiente de transmissão térmica do caixilho;
- Fator solar do vidro;
- Dispositivos de proteção solar;
- Permeabilidade ao ar;

- Fração envidraçada;
- Orientação do vão envidraçado;
- Com ou sem sombreamento por elementos horizontais ou por elementos verticais;
- Relação entre a área envidraçada e a área do pavimento que servem.

2 . As características dos edifícios:

- Localização geográfica do edifício;
- Localização em altura da fração no edifício;
- Localização do edifício em relação à exposição ao exterior;
- Coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior;
- Inércia térmica dos elementos de construção;
- Cor da face exterior da envolvente, coeficiente de absorção da radiação solar;
- Profundidade dos compartimentos, distância entre a fachada (onde está inserida o vão envidraçado) e a parede oposta;
- Pé direito;
- Renovações horárias do ar;
- Ganhos de calor (radiação solar, ocupação, equipamentos e iluminação);
- Controlo da temperatura interior.

## 1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

Pretende-se com esta tese compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico dos edifícios e no conforto térmico dos ocupantes, tendo em vista, o desenvolvimento de um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados. Para tal assumem-se dois grandes objetivos principais:

- Caracterizar as condições de conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados: o conhecimento das condições de conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados é essencial pois só dessa forma se poderá fazer uma análise aprofundada do efeito dos vãos envidraçados e, a partir daí, avançar para o segundo objetivo de uma forma sustentada em termos de opções adotadas;
- Propor um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados: pretende-se efetuar uma otimização de soluções para os vãos envidraçados a aplicar em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços. Para tal serão utilizadas ferramentas computacionais avançadas de simulação e otimização.

Para atingir os dois objetivos principais definiu-se um conjunto de tarefas e objetivos parciais, que a seguir se sintetizam:

- Compilar a informação mais atual sobre o desempenho térmico dos edifícios, incluindo todas as componentes relevantes para este trabalho, designadamente a caracterização da envolvente dos edifícios, as ferramentas computacionais de simulação numérica, a avaliação da

qualidade do ambiente interior (conforto térmico interior) e a caracterização dos vãos envidraçados;

- Realizar uma campanha experimental de monitorização anual que permitisse avaliar o desempenho térmico de um edifício e o conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados (1,20 m). Efetuou-se uma caracterização completa do desempenho dos espaços escolhidos através da monitorização das temperaturas, humidade relativa, velocidade do ar, e da medição pontual dos caudais de ventilação. Também foram registados os dados climáticos, para a elaboração de um ficheiro climático anual: a temperatura do ar; a temperatura de ponto de orvalho; a humidade relativa; a velocidade e direção do vento; a radiação solar global em superfície horizontal e a pressão atmosférica. Foram definidos quatro períodos para as campanhas de medições, verão, meia estação (outono e primavera) e inverno e escolhidos dois espaços de um edifício de serviços, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, ESTGV.
- Os resultados obtidos nas campanhas experimentais permitiram fundamentar a análise crítica dos modelos de avaliação da qualidade do ambiente interior atualmente mais utilizados, comparar as condições verificadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçados e validar as opções adotadas para a otimização das soluções construtivas, nomeadamente no que diz respeito à caracterização dos vãos envidraçados, à profundidade dos compartimentos e utilização dos elementos de sombreamento;
- Efetuar consultas e posterior seleção de um programa de cálculo automático validado, adequado à simulação térmica, que permitisse avaliar o seu desempenho de acordo com os pressupostos e objetivos definidos;
- Criar modelos dos edifícios onde estão inseridos os compartimentos monitorizados, devidamente validados pelos resultados das campanhas experimentais, utilizando o ficheiro climático criado, que permitissem avançar para a otimização de soluções construtivas a aplicar no modelo simplificado de seleção dos vãos envidraçados;
- Realizar uma campanha alargada de simulações anuais, variando as propriedades mais relevantes das soluções para os vãos envidraçados que se pretendem otimizar. Uma vez que as simulações anuais são processos computacionais exigentes e morosos, e um processo de otimização deste tipo requer um número elevado de simulações, criaram-se novos modelos de edifícios (espaços) constituídos apenas por uma zona, com diferentes condições de envolvente (área da fachada, área de envidraçado, tipo de envolvente, profundidade, cor da fachada, tipo caixilho e de vidro, sistemas de proteção solar e de sombreamento por elementos exteriores, espessura de isolamento térmico, tipo de inércia térmica, e ventilação natural), para diferentes orientações da fachada e diferentes localizações, cuja geometria corresponde a situações construtivas correntes;
- Definir funções avaliadoras do desempenho dos edifícios, que possam ser calculadas a partir dos resultados da simulação e que traduzam as opções a otimizar;
- Utilizando as funções avaliadoras do desempenho entretanto definidas pretende-se realizar um estudo paramétrico de avaliação do efeito da alteração de cada uma das variáveis em estudo considerando diferentes orientações dos vãos envidraçados e localizações dos edifícios;



- Efetuar consultas e posterior seleção de um programa de análise estatística que permita tratar a grande quantidade de resultados das funções avaliadoras;
- Proceder a uma otimização das variáveis em estudo recorrendo a programas comerciais de forma a obter as melhores soluções;
- Criar um “Modelo Simplificado de Seleção”, utilizando programa de análise estatística e otimização, que permita selecionar diferentes soluções para os vãos envidraçados e visualizar o resultado obtido e fazer comparações.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em seis capítulos:

- O Capítulo 1, **Introdução**, onde se procura fazer o enquadramento e apresentar a motivação da presente Tese ao nível das atuais preocupações energéticas e ambientais e o conforto dos ocupantes, ao nível das exigências regulamentares, permitindo apresentar os objetivos a atingir.
- No Capítulo 2, **Estado da Arte**, é feita uma abordagem ao estado da arte relativamente ao desempenho térmico dos edifícios, incluindo todas as componentes relevantes para este trabalho, designadamente a caracterização da envolvente dos edifícios, as ferramentas computacionais de simulação numérica, a avaliação da qualidade do ambiente interior (conforto térmico interior) e a caracterização dos vãos envidraçados.
- No Capítulo 3, **Avaliação Experimental**, para apresentar a avaliação experimental do desempenho térmico e do conforto nas zonas próximas dos vãos envidraçados relativa a dois espaços de um edifício de serviços, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, ESTGV, consideraram-se quatro subcapítulos. No primeiro subcapítulo definem-se os objetivos e a metodologia utilizada. No segundo subcapítulo faz-se a descrição e caracterização dos espaços analisados e medições efetuadas. No terceiro subcapítulo faz-se a análise dos resultados obtidos em relação ao desempenho e ao conforto térmico. E por fim no quarto subcapítulo apresentam-se algumas conclusões.
- No Capítulo 4, **Simulação Numérica**, para apresentar a otimização do desempenho térmico e do conforto térmico no interior do edifício relativa a espaços de edifícios de habitação e de edifícios de serviços, foi criado um modelo de um edifício constituído apenas por uma zona (espaço), com diferentes condições de envolvente (área da fachada, área de envidraçado, tipo de envolvente, profundidade, cor da fachada, tipo de caixilho e de vidro, utilização de diferentes sistemas de proteção solar e de sombreamento por elementos exteriores, espessura de isolamento térmico, tipo de inércia térmica, e ventilação natural), para diferentes orientações da fachada e diferentes localizações, cuja geometria corresponde a situações construtivas correntes. Como se pretende analisar as condições adequadas de conforto térmico interior em função das suas características e para determinado tipo de exposição exterior, considerou-se como adiabáticas todas as envolventes interiores, anulando desta forma as trocas de calor entre zonas do mesmo edifício. Posteriormente foram apresentados e analisados alguns dos resultados obtidos nas simulações e alguns resultados obtidos após aplicação das funções de avaliação do desempenho, de modo, a: apresentar a evolução das condições no interior dos espaços; apresentar a sensibilidade dos espaços em relação à aplicação das funções de avaliação do desempenho para a estação de aquecimento e para a estação de arrefecimento; verificar se há coerência nos resultados obtidos, em relação às duas estações do ano analisadas; verificar o

funcionamento correto do programa e de todo o procedimento automático utilizado em relação às diferentes variáveis consideradas nas simulações.

- O Capítulo 5, **Modelo de Seleção**, apresenta o processo de otimização adotado. Numa primeira fase descrevem-se os objetivos e a metodologia a utilizar. De seguida, são apresentados os programas que permitem fazer a apresentação e a análise de dados e desta forma obter as soluções otimizadas para os vãos envidraçados, e mostram-se os resultados de uma análise paramétrica das características relacionadas com os vãos envidraçados. No final, propõem-se dois modelos simplificados de seleção das características relacionadas com os vãos envidraçados, sem e com climatização, baseado na análise dos resultados das funções de avaliação do desempenho, e realiza-se uma aplicação desses modelos.
- O Capítulo 6, **Conclusões**, apresenta o resumo das principais conclusões desta Tese e perspetiva o desenvolvimento de trabalhos futuros neste domínio de investigação.

# 2

## ESTADO DA ARTE

### 2.1. DESEMPENHO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

Por razões de saúde e produtividade dos trabalhadores (ocupantes) a melhoria das condições do ambiente de trabalho (interior) tornou-se uma necessidade. Com o desenvolvimento das tecnologias de controlo ambiental mecânico assim como o aumento dos padrões de vida a utilização de sistemas centralizados de ar condicionado a custos mais acessíveis tornaram-se comuns.

A proliferação deste tipo de sistemas levou a que a conceção dos edifícios deixasse de ter em consideração a análise do contexto climático em que estes se inserem. Assim, até meados dos anos 70 do século XX o conforto térmico nos edifícios conseguiu-se principalmente à custa de um desperdício acentuado de energia (despreocupado devido ao seu baixo custo). Com as crises petrolíferas de 1973 e 1979 e com consequente encarecimento do petróleo teve-se consciência de que as fontes de energia não são inesgotáveis, tornando-se imprescindível uma utilização racional da energia.

A partir dos anos 90 do século XX a prioridade passou a ser orientada para a gestão económica, e a questão do ambiente global, resultante dos gases causadores do efeito de estufa (GEE), começou a ser considerado um problema grave.

No inquérito ao consumo de energia no setor doméstico em Portugal (aquecimento e arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas, cozinha, equipamentos elétricos e iluminação) realizado em 2010 pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e pela Direcção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) [1] [2], podemos observar que:

- O consumo de energia no setor doméstico representava, em 2009, 17,7% do total do consumo final de energia, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 1,5% entre os anos de 1989 e 2009, figura 2.1;
- O setor doméstico é o terceiro maior consumidor de energia depois dos setores dos transportes (37,5%) e da indústria (30,5%). O consumo de energia no setor dos edifícios (domésticos e serviços) (29,7%) acaba por ser equivalente ao da indústria, figura 2.2;
- Face ao consumo de energia associado (21,5% do consumo correspondente a apenas 10,7% da despesa) o aquecimento do ambiente surge como o tipo de utilização menos dispendioso, em grande medida devido ao elevado consumo de lenha para essa finalidade (68% da energia consumida no aquecimento do ambiente corresponde a lenha), que surge assim como a mais económica fonte de energia utilizada no setor doméstico, figura 2.3 e 2.4;
- O arrefecimento do ambiente surge com uma utilização reduzida de energia no setor doméstico (0,5%), figura 2.3.

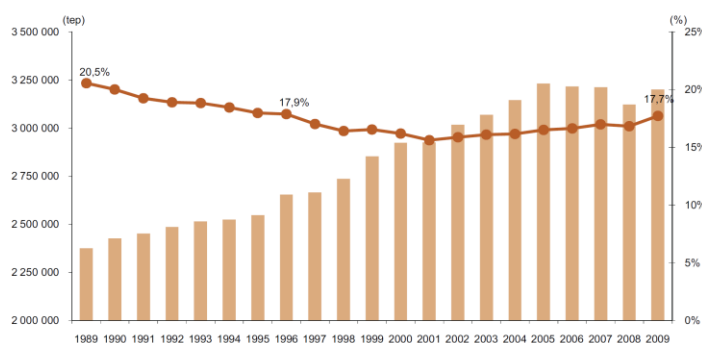


Fig.2.1. – Evolução do consumo no setor doméstico (tep) e peso (%) do consumo do setor doméstico no consumo final total de energia, 1989-2009 [1] [2]

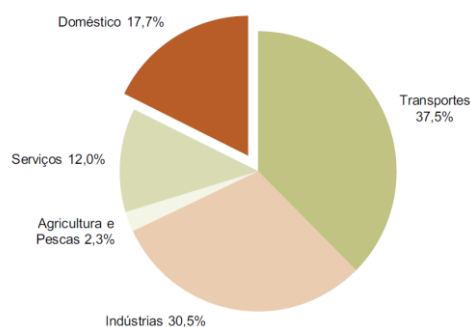


Fig.2.2. – Repartição do consumo de energia final por setor em 2009, adaptado de [2]

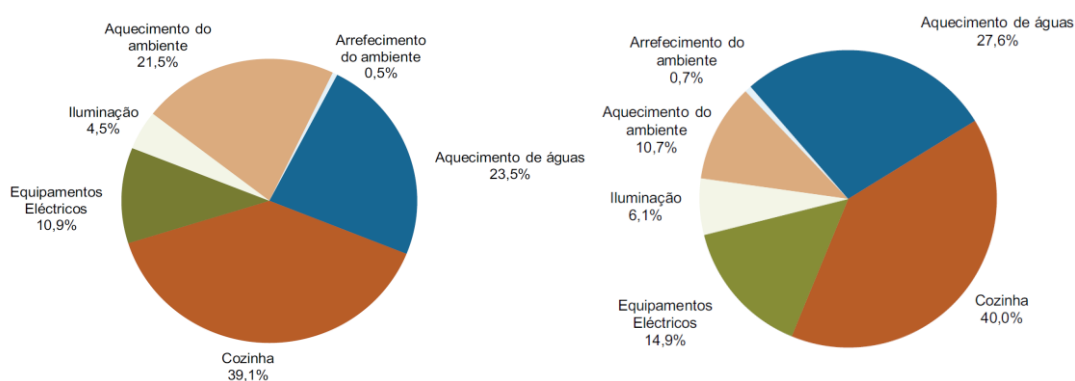


Fig.2.3. – Distribuição do consumo e da despesa com a energia no alojamento por tipo de utilização, respetivamente à esquerda e à direita, adaptado de [2]

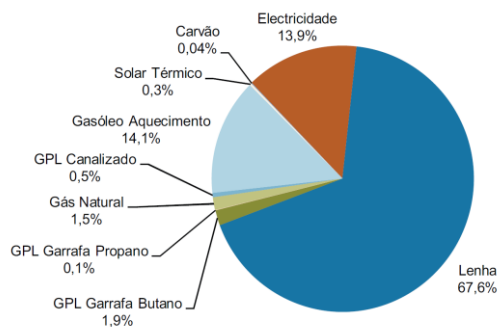


Fig.2.4. – Distribuição do consumo de energia para aquecimento ambiente por tipo de fonte em Portugal, 2010, adaptado de [2]

Os consumos energéticos médios relativos ao conforto ambiental não são muito significativos em Portugal mas têm vindo a aumentar a um ritmo elevado e tendem a generalizar-se. Caso não surja, em breve, na construção dos edifícios uma aplicação rigorosa dos princípios, regras ou normas que promovam a utilização racional de energia, os níveis de conforto tenderão a ser atingidos cada vez mais recorrendo a sistemas de condicionamento de ar interior, o que fará aumentar os consumos globais no setor [13].

Sendo os edifícios, tanto os de habitação como os de serviço, responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia final, figura 2.2, a União Europeia (EU) na sua Diretiva 2002/91/CE [14] para a eficiência energética, reformulada pela Diretiva 2010/31/EU [5], cujas disposições foram transpostas nos estados membros em janeiro de 2006, refere o aumento da eficiência energética dos edifícios, como uma das metas mais importantes.

O ambiente envolvente tem um efeito físico e psicológico no indivíduo sendo de grande importância para o projeto de edifícios. O estudo do desempenho térmico dos edifícios, tem como um dos objetivos principais o conforto térmico dos seus utilizadores.

Os dados necessários para avaliar o desempenho térmico de um edifício podem ser obtidos por monitorização “*In Situ*” e/ou por simulação numérica, conforme descrito a seguir.

A avaliação do desempenho térmico dos edifícios é da maior importância para a eficiência energética e para as condições de conforto higrotérmico dos ocupantes, mas essa avaliação não é uma tarefa fácil. Alguns conceitos fundamentais no que respeita à compreensão da análise do desempenho dos edifícios são os seguintes [15]:

- Previsão: desenvolvimento de modelos que simulem comportamentos supostamente reais dos edifícios ou dos seus componentes. Estes modelos podem ir desde cálculos numéricos até uma sofisticada ferramenta computacional de simulação de edifícios. Dependendo do tipo de desempenho que se pretende prever e respetiva complexidade, deverá ser escolhido um método que se adequa;
- Precisão da previsão: a precisão das previsões do desempenho dependem do modelo utilizado e da exatidão dos dados de entrada. Para tal, de forma a utilizar dados precisos, além da caracterização dos componentes, é fundamental conhecer a forma como os edifícios são geridos e utilizados;
- Avaliação: a avaliação do desempenho envolve a comparação entre o desempenho de várias alternativas de projeto (design), e entre o enquadramento legislativo que regula o desempenho que o edifício deverá possuir.

A avaliação do desempenho dos edifícios é um processo que implica um alto grau de dificuldade, pois um edifício é um sistema complexo, em que cada componente (paredes, vãos envidraçados, pavimentos, coberturas, etc.) tem um papel importante no desempenho energético global. Adicionalmente, existem efeitos cruzados, sinergias, entre os vários componentes que podem ser bastantes relevantes.

A simulação de modelos complexos por longos períodos de tempo torna-se um procedimento muito demorado e computacionalmente exigente. Assim, quando se pretende avaliar e aumentar a eficiência energética anual, obtendo um bom desempenho e garantindo o conforto térmico dos ocupantes o processo de otimização direto é quase impraticável devido ao elevado número de simulações necessárias.

A utilização de ferramentas computacionais de simulação de edifícios traz numerosas vantagens, quer do ponto de vista económico, quer do ponto de vista ambiental, que compensam inteiramente os custos acrescidos da realização de análises e simulações desde a fase inicial do projeto [16].

## 2.1.2. IMPORTÂNCIA DA CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS

### 2.1.2.1. Introdução

A envolvente do edifício é o elemento determinante no que respeita ao comportamento térmico dos edifícios. É possível conseguir reduções significativas no consumo de energia para climatização dos edifícios, de forma a garantir o conforto térmico dos seus utilizadores, se forem acautelados alguns aspetos do projeto da envolvente do edifício, nomeadamente [9]:

- Caraterização da localização do edifício;
- Implantação do edifício (orientação do edifício, sombreamento, etc.);
- Volume da construção (área útil de pavimento e pé direito médio);
- Otimização da relação ganhos solares/iluminação natural;
- Forma do edifício;
- Organização interna dos espaços;
- Isolamento térmico da envolvente;
- Tratamento das pontes térmicas;
- Geometria e orientação dos vãos envidraçados;
- Utilização de vidros e caixilharias de boa qualidade e sombreamento cuidado de todos os envidraçados (exceto se orientados a norte);
- Adoção de soluções construtivas de inércia média ou forte;
- Estratégias de arrefecimento por ventilação natural.

Para além destes fatores, intrínsecos ao edifício propriamente dito, importa também acautelar alguns aspetos relacionados com o tratamento do seu local de implantação, nomeadamente no que diz respeito aos arranjos exteriores, exposição e proteção à radiação solar, à proteção contra os ventos frios, etc..

Durante a fase de conceção, a equipa de projeto, deverá realizar uma escolha criteriosa dos materiais a utilizar e integrar o estudo da envolvente com os restantes projetos: iluminação natural e outras estratégias de comportamento solar passivo: aquecimento, arrefecimento e ventilação natural. O aspeto que mais influencia a conceção da envolvente é o clima. Assim, para cada tipo de clima (quente/seco, quente/húmido, temperado, ou frio), deverão ser consideradas diferentes estratégias no desenho e escolha dos materiais da envolvente.

Para além do clima, a definição da envolvente depende também da quantidade de calor produzida nos espaços interiores pelos seus utilizadores, equipamentos e iluminação. Se a quantidade de calor produzida no interior for muito grande, serão as cargas térmicas produzidas no interior, e não as exteriores (solares), as que mais influenciarão os níveis de temperatura interior. O volume do edifício, bem como a sua orientação, são outros fatores que influenciam significativamente o comportamento e os requisitos da envolvente. A envolvente deve ser cuidadosamente estudada de modo a ser

compatível com o local de implantação, com a orientação do edifício e com o tipo de utilização do edifício.

A procura destas soluções pressupõe a necessidade de um conhecimento eficaz do comportamento dos edifícios. O que se pretende com essa caracterização é a simulação do balanço térmico entre os ambientes interior e exterior do edifício, como mostra a figura 2.5.

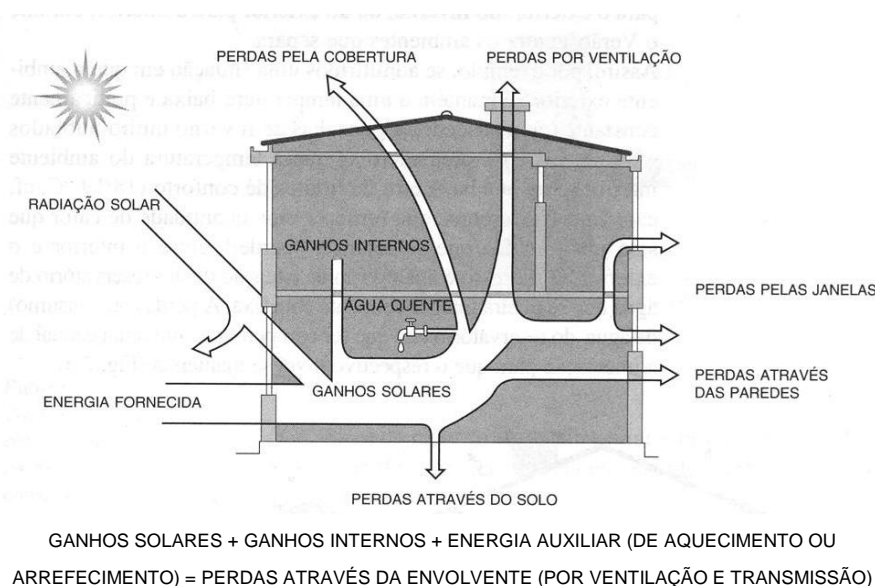


Fig.2.5. – Balanço térmico de um edifício, adaptado de [17]

A temperatura do ar interior é em primeiro lugar influenciada por parâmetros climáticos exteriores (radiação solar, temperatura exterior, velocidade e direção do vento, etc.) e pelos ganhos internos (atividade humana, equipamento e iluminação), bem como pelas características dos elementos construtivos.

Nos pontos seguintes descrevem-se os princípios fundamentais que regem esse balanço térmico. A captação, o armazenamento, a distribuição e a conservação da energia é feita diretamente nas zonas úteis do edifício desde que disponha de um vão envidraçado, que funciona como um sistema de ganho direto [18]. As pré-condições para um funcionamento eficiente são:

- Correta orientação dos vãos envidraçados, preferentemente a Sul, para evitar que as perdas superem os ganhos no inverno e prevenir o sobreaquecimento no verão;
- Área transparente dos vãos envidraçados em harmonia com a capacidade de armazenamento térmico;
- Uso de dispositivos de sombreamento, como forma de prevenir o sobreaquecimento no verão;
- Redução das perdas de calor, com a aplicação de isolamento térmico eficiente dos elementos opacos, isolamento noturno móvel e posicionamento de zonas tampão.

#### 2.1.2.2. Ganhos de Calor

A radiação solar alcança as superfícies exteriores de um edifício de forma direta, difusa e refletida e penetra no interior através dos elementos transparentes. A radiação incidente varia com a latitude geográfica, altura acima do nível do mar, condições atmosféricas gerais, dia do ano e hora do dia. Uma exposição a Sul tem a vantagem de captar a radiação solar no inverno e de receber pouca radiação

solar direta no verão, especialmente se for instalado um elemento de sombreamento (pala horizontal), porque o sol está mais elevado no céu. Para as orientações a Sudeste e a Sudoeste, a radiação diminui durante o inverno, mas durante o verão, essas superfícies recebem mais radiação solar do que as superfícies orientadas a Sul, particularmente a latitudes mais baixas. Isto pode conduzir ao sobreaquecimento devido à dificuldade em proteger estas superfícies de uma localização mais baixa do sol no horizonte, aconselhando-se a instalação de elementos de sombreamento laterais (pala vertical). As superfícies orientadas a Norte recebem quantidades insignificantes de radiação durante o inverno. As superfícies inclinadas a Sul recebem mais radiação do que as superfícies verticais, conduzindo por vezes a ganhos solares indesejáveis durante o verão.

A admissão da radiação solar no espaço interior pode causar problemas, tais como temperaturas interiores elevadas (sobreaquecimento), o desconforto térmico e visual dos ocupantes, danos em objetos sensíveis e no mobiliário. Assim, é de importância vital que a radiação solar deva ser controlada com a utilização de vidros com menor fator solar, proteções solares e dispositivos de sombreamento nos vãos envidraçados. Das propriedades dos envidraçados depende, em grande parte, a "quantidade" e a "qualidade" da luz natural disponível no interior dos edifícios, sem falar noutros aspetos igualmente importantes (conforto térmico, acústico, consumo energético, etc.).

Tradicionalmente, a utilização de palas de sombreamento, toldos, vegetação e outros dispositivos de sombreamento exterior, tem sido a melhor estratégia para a minimização da radiação solar, bloqueando-a antes de ela atingir as superfícies envidraçadas. A redução dos ganhos solares térmicos após a radiação solar atingir os envidraçados torna-se uma tarefa mais difícil. Antes da existência de produtos envidraçados como os vidros coloridos ou os revestimentos, vidros com fator solar menor, a limitação dos ganhos solares estava limitada a utilização de uma ou duas camadas de vidro transparente (geralmente de 4 mm de espessura), que permitem a passagem de 75% a 85% da energia solar para o interior dos edifícios. A adição de dispositivos interiores de proteção, como sejam cortinas ou estores de lâminas, permite refletir para o exterior, através do vidro, alguma energia, mas a maior parte da energia solar permanece no interior. Assim, algumas estratégias possíveis para minimização dos ganhos solares são as seguintes [19] [20]:

- Utilização de vidros coloridos;
- Utilização de revestimentos refletantes;
- Utilização de revestimentos refletantes de baixa-emissividade e espectralmente seletivos;
- Utilização de dispositivos de proteção interiores (em última escolha);
- Utilização de dispositivos de proteção exteriores (preferíveis);
- Utilização de dispositivos de sombreamento verticais e/ou horizontais.

Normalmente, não se consideram ganhos solares pela envolvente opaca exterior (paredes e coberturas) no inverno (estação de aquecimento), porque estes se existirem são muito pouco significativos. Já no verão (estação de arrefecimento) esses ganhos solares dependem da localização do edifício (zona climática), da orientação, da inclinação, das características de absorção da radiação solar e do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente opaca.

O REH [8] prevê a existência de sistemas especiais (solares passivos) de captação de energia solar para aquecimento, do tipo “paredes de armazenamento térmico” (sistemas de ganhos indiretos, tipo parede de Trombe sem ventilação), desde que orientados no quadrante Sul.

Os ganhos térmicos internos correspondem ao calor libertados pelos ocupantes, eletrodomésticos, iluminação e todas as fontes de calor situadas no interior, excetuando os equipamentos de



aquecimento, fogão, esquentador e aparelhos a gás ligados a condutas de evacuação, correspondem a um valor médio ao longo das 24 horas do dia e de toda a estação de aquecimento. Para assegurar uma comparação do desempenho térmico de edifícios com o mesmo tipo de utilização o REH [8] indica valores de referência para os ganhos térmicos internos, iguais a  $4 \text{ W/m}^2$  em edifícios de habitação, variando entre 4 e  $7 \text{ W/m}^2$  em edifícios de serviços.

#### 2.1.2.3. Inércia Térmica

O calor que entra num compartimento através da radiação solar e/ou que é produzido por uma fonte interna vai ser absorvido pelos elementos construtivos ou vai aumentar a temperatura do ar interior.

O conceito da inércia térmica é uma noção que cobre a acumulação do calor e sua subsequente libertação com um retardamento no tempo de acordo com as características físicas (calor específico e densidade), dimensionais e ambientais do elemento de armazenamento. Uma inércia térmica forte permite a absorção do calor durante o dia e só ser reemitido durante a noite quando a temperatura do espaço diminui. Deste modo há então dois conceitos que importa referir: o desfasamento da temperatura interior em relação à temperatura exterior e o amortecimento, os picos de temperatura interior são amenizados, o que pode ser útil quer de inverno, quer de verão.

Quanto maior é a capacidade de armazenamento de calor menor é a flutuação da temperatura no interior do edifício, a colocação de isolamento térmico na superfície interior dos elementos construtivos, nos casos em que interessa obter uma inércia térmica forte, é desaconselhável porque neutraliza a absorção de calor por parte destes elementos.

No sistema de ganho direto o compartimento a aquecer dispõe de vãos envidraçados orientados a Sul de forma a possibilitar a incidência da radiação no compartimento e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos). Nos sistemas de ganho indireto a massa térmica dos sistemas é interposta entre a superfície de ganho e o compartimento a aquecer. A massa térmica absorve a energia solar nela incidente sendo posteriormente transferida para o compartimento. Existem diversos sistemas de ganho indireto, nomeadamente: parede de Trombe, colunas de água, massa térmica móvel, etc. Nestes sistemas verifica-se um desfasamento da onda de calor transmitida para o compartimento e o ciclo da radiação solar. Os compartimentos onde estes sistemas se encontram integrados apresentam temperaturas mais elevadas no final da tarde e início da noite.

#### 2.1.2.4. Distribuição de Calor

Durante a estação de aquecimento a circulação de ar contribui para aumentar as perdas de calor, mas pode também distribuir os ganhos solares armazenados na massa dos elementos construtivos dos compartimentos com ganhos solares consideráveis para outras zonas do edifício. Durante a estação de arrefecimento a circulação de ar contribui para a diminuição da temperatura interior e ainda para a remoção do calor armazenado na massa dos elementos construtivos. A redistribuição do calor armazenado por todo o edifício e as trocas de calor nos elementos da envolvente ocorrem sempre que houver uma diferença de temperatura, de três maneiras diferentes:

- **Condução** - A energia térmica é transportada entre partes de um meio contínuo pela transferência de energia entre partículas individuais ou grupos de partículas. A condução de calor dá-se entre dois corpos que estejam em contato ou entre uma zona de um corpo para outra zona do mesmo corpo e, é um mecanismo que envolve a transferência de energia cinética de moléculas a temperatura mais elevada para moléculas a temperatura mais baixa;

- **Convecção** - Transferência de calor devido à deslocação do ar (ventilação). A convecção pode ser natural (ventilação natural - o movimento do ar é provocado por suas diferenças de densidade causadas pelas diferenças de temperatura) ou forçada (ventilação mecânica - forças externas impelem o ar contra a região de calor);
- **Radiação** - Transferência de energia sob a forma de radiação eletromagnética, que não necessita de um suporte material para se propagar. Dois corpos a temperaturas diferentes separados por vácuo, não podem transferir calor nem por condução nem por convecção, mas trocam calor por radiação. E, mesmo que exista um meio, por exemplo, o ar, ele não é afetado pela passagem da energia eletromagnética. A radiação eletromagnética é emitida por um corpo devido à sua temperatura e é emitida em todas as direções do espaço. As ondas, ao atingirem um corpo, são em parte absorvidas, em parte refletidas e em parte transmitidas. Se a radiação incidente no corpo é radiação térmica (que depende do comprimento de onda da radiação), a radiação absorvida pelo corpo aparece sob a forma de calor.

A ventilação natural é um processo com o qual o edifício é ventilado para providenciar o arrefecimento e a renovação do ar do edifício pela ação de mecanismos naturais (ao contrário da ventilação mecânica com a utilização de ventiladores). São dois os mecanismos responsáveis pela ventilação natural nos edifícios:

- O efeito de chaminé;
- O vento.

O **efeito de chaminé** deve-se a uma diferença de massa volúmica entre o ar interior e o ar exterior, e esta varia essencialmente, com a temperatura e a humidade, resultando numa diferença de pressão estática entre o interior e o exterior ( $\Delta p$  [Pa]) [21].

O **vento** dá origem a um escoamento de ar em volta de um edifício que gera na envolvente pressões estáticas superiores ou inferiores à pressão atmosférica. As primeiras ocorrem nas zonas da envolvente expostas diretamente à incidência do vento, enquanto as últimas predominam nas zonas da envolvente do lado oposto ao da direção do vento. Nas coberturas, as pressões e depressões dependem da inclinação das águas.

O REH [8], por razões de higiene e conforto dos ocupantes, obriga que os edifícios sejam ventilados em permanência por um caudal mínimo de ar e, devem possuir características construtivas ou dispositivos apropriados para garantirem, por ventilação natural ou mecânica, uma taxa de renovação ( $R_{ph}$ ) mínima de  $0,4 \text{ h}^{-1}$ .

#### 2.1.2.5. Conservação da Energia

Na conceção dos espaços interiores e na sua organização, o projetista deverá ter em consideração a função de cada compartimento, a sua orientação e exposição, o dimensionamento da área dos vãos envidraçados, o tipo de superfície de cada compartimento (massa térmica dos elementos construtivos e tipo de revestimento), as trocas de calor possíveis entre compartimentos determinadas, em parte, pela sua organização interna, características de funcionamento dos sistemas de aquecimento, de iluminação e de ventilação previstos e pelos ganhos internos, em função do tipo de ocupação. É ao nível dos compartimentos interiores que se colocam as exigências de conforto térmico, visual, acústico e da qualidade do ar, é então, necessário especificar e agrupar as exigências ambientais do projeto.

A configuração do edifício, tanto em planta como em altura, atendendo às suas necessidades de aquecimento, arrefecimento, iluminação e ventilação, deve contribuir significativamente para reduzir o consumo de energia do edifício.

O nível de isolamento térmico ideal pode variar de edifício para edifício. Onde for necessário arrefecer, devido às fontes de calor internas e aos ganhos solares excessivos combinados com as condições de tempo favoráveis, o isolamento térmico tem um efeito desfavorável já que o objetivo da sua aplicação é conservar o calor dentro do compartimento. No entanto, um edifício com uma baixa taxa de ocupação, com ganhos internos limitados, e ganhos solares reduzidos, será necessário aquecer, então, o isolamento térmico pode ter o papel principal na economia da energia.

Na Informação Técnica de Edifícios do LNEC, ITE 50 [19], apresentam-se os valores convencionais de cálculo, por um lado, de condutibilidades térmicas de materiais e de resistências térmicas superficiais, de espaços de ar não-ventilados e de alguns elementos opacos de construção e, por outro lado, os coeficientes de transmissão térmica de soluções correntes das envolventes opacas e envidraçadas dos edifícios.

A aplicação do isolante pelo interior é fortemente desaconselhada, em virtude de conduzir a uma redução sensível da inércia térmica interior, e ao risco de ocorrência de condensações, humidade no interior do elemento construtivo, além de agravar as solicitações termo-mecânicas da estrutura e no revestimento exterior.

A existência de pontes térmicas na envolvente dos edifícios, para além de provocar um aumento da perda térmica para o exterior, durante a estação de aquecimento, devido à sua menor resistência térmica, está também na origem de diversas anomalias associadas à diminuição de temperatura superficial e ao aparecimento de bolores. Uma ponte térmica é toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas e/ou uma modificação na geometria da envolvente, como é o caso das ligações entre diferentes elementos construtivos [22]. Segundo o REH [8] uma ponte térmica plana “é a heterogeneidade inserida em zona corrente da envolvente, como pode ser o caso de certos pilares e talões de viga”.

Da caracterização térmica de pontes térmicas realizada por Helena Corvacho [22] e Isabel Abreu [23] identificaram-se as zonas mais problemáticas para a ocorrência de condensações em função da localização no edifício. Em cada uma destas zonas, a gravidade das situações depende, como é evidente, das características dos materiais utilizados, do tipo de disposição construtiva existente e da localização do isolamento térmico utilizado. As ligações entre dois elementos exteriores (como por exemplo, entre duas paredes de fachada ou entre a cobertura e a parede de fachada) são as zonas mais críticas. O contorno dos vãos (incluindo as caixas de estore) é também uma zona problemática. Os valores da temperatura podem ser muito baixos, embora, normalmente, numa zona estreita, junto à caixilharia, deverá proceder-se, assim, a uma pormenorização cuidada.

Sendo os vãos envidraçados parte integrante das fachadas e, por vezes, das coberturas, devem contribuir para a limitação das ações exteriores em conjunto com os outros elementos da envolvente, sem condicionar desfavoravelmente a integridade física e o bem-estar dos ocupantes. Para além disso, a fenestração deve ainda cumprir algumas outras funções, tais como assegurar a contato visual com o exterior, assegurar a iluminação natural dos compartimentos e promover a ventilação natural dos compartimentos, através de aberturas [20]. A necessidade de cumprir funções tão diversas torna estes componentes particularmente sensíveis a deficiências de conceção e de dimensionamento [24].

A infiltração do ar nem é eficaz nem é um método de ventilação controlável. A infiltração do ar deve ser minimizada. O ar move-se das áreas mais quentes para as áreas mais frescas e das áreas de alta pressão para as áreas de baixas pressões. A alta pressão existe normalmente no lado do edifício que enfrenta o vento dominante com uma pressão mais baixa do que no lado oposto. Estas áreas sobre pressão e os fluxos de ar normais podem ser manipuladas pela forma do edifício e pela colocação de condutas de ar.

### 2.1.3. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE EDIFÍCIOS

#### 2.1.3.1. Introdução

Nas últimas décadas deu-se uma rápida evolução na metodologia utilizada para o cálculo de cargas térmicas, resultante em grande parte, da evolução do uso de computadores. Se nas décadas de 1960-1970 o uso de computadores se limitava a “grandes computadores” com entrada de dados por fita ou cartões perfurados, a partir da década de 1980 começou a incentivar-se o uso de computadores pessoais, situação generalizada na década de 1990, com velocidades de processamento elevadas. Desta forma foi possível tornar mais complexa a determinação da carga térmica, dado deixar de ser necessário efetuar o seu cálculo manualmente ou utilizar modelos muito simplificados que permitiam, através de tabelas, gráficos e ábacos, determinar cargas térmicas através de superfícies opacas e transparentes, calcular sombreamentos e determinar a quantidade de calor acumulada na estrutura do edifício [25].

Os métodos de cálculo atualmente mais utilizados são os propostos pela ASHRAE [26] a partir do final da década de 1990, os quais se revestem de uma complexidade que não permite uma resolução manual ou através de simples folhas de cálculo. O método do balanço energético (HB - *Heat Balance Method*) foi proposto em 2001, sendo dos diferentes métodos propostos, o método mais correto para estimar a carga térmica, já que os restantes métodos correspondem a simplificações do princípio de balanço energético. Com este método é possível calcular a carga térmica considerando a zona a temperatura constante, ou com temperatura variável devido a não existir controlo da temperatura do local.

No entanto os outros métodos também são utilizados, dado que a resolução pelo método HB, sendo de elevada complexidade, obriga a uma informação muito completa sobre os elementos constituintes do edifício. O balanço energético é efetuado considerando a superfície exterior, as superfícies interiores e o espaço climatizado, sendo as equações de balanço acopladas às funções de transferência (CTF - *Conduction Transfer Functions*) dos elementos estruturais (paredes e pavimentos) de forma a poderem ser determinadas as temperaturas superficiais desses elementos e a carga térmica, enquanto que para os vãos envidraçados é considerada a radiação absorvida e calculadas as trocas de calor entre as superfícies interior e exterior do vidro, de forma a determinar as suas temperaturas superficiais, sendo a radiação transmitida (direta e difusa) também determinada.

Para simular o desempenho térmico de edifícios as ferramentas computacionais de simulação permitem representar com grande realismo as trocas de calor entre o interior e o exterior que ocorrem através dos elementos da envolvente (opacos e vãos envidraçados). Mas neste processo de reprodução dos fenómenos físicos do modelo do edifício, essas ferramentas necessitam de variáveis de entrada “input” que caracterizam corretamente o edifício.

A previsão do desempenho energético dos vãos envidraçados é um processo complexo, e deve ter em consideração a interação de vários processos (térmicos, acústicos, ventilação, iluminação, visual).

Esses processos dependem das propriedades dos vários componentes da fachada, nomeadamente: geométricas, térmicas, físicas, óticas e aerodinâmicas.

As ferramentas computacionais de simulação permitem modelar todo o edifício, trabalham com três grupos de variáveis principais, que reúnem um conjunto de parâmetros que influenciam o desempenho térmico dos edifícios, são elas:

- Variáveis climáticas locais;
- Variáveis de projeto (compartimentação, características dos elementos construtivos, etc.);
- Variáveis de utilização e ocupação (atividade, ganhos internos, rotinas, utilização de equipamentos de AVAC, etc.).

O modelo do edifício é constituído por zonas. Cada zona é considerada uniforme e deve corresponder a um compartimento. Este tipo de modelação permite ter em conta as diferentes condições de cada compartimento, os fluxos de energia e o movimento do ar dentro do edifício. Como se baseia na hipótese de que o ar tem características uniformes no interior de cada zona, as suas limitações surgem em compartimentos onde se verificam fortes heterogeneidades do ar [27].

#### 2.1.3.2. Ferramentas Computacionais de Simulação

Para avaliar adequadamente o efeito de uma determinada solução construtiva no desempenho do edifício é necessária a utilização de ferramentas computacionais simulação dinâmica multi-zona de edifícios como EnergyPlus, TRANSYS, ESP-r, etc..

Com o intuito de facilitar a escolha dos utilizadores, existem alguns estudos publicados contendo uma compilação das ferramentas computacionais mais importantes de avaliação do desempenho higratérmico e energético dos edifícios, incluindo uma comparação entre eles, evidenciando as potencialidades e os pontos fracos de cada modelo [28] [29] [30].

#### 2.1.3.3. Programa EnergyPlus

O programa *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory*, em sociedade com outros laboratórios, resultou da fusão dos programas BLAST (*Building Loads analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, ambos desenvolvidos no final da década de 1970 e início da década de 1980 [10]. A criação do programa *EnergyPlus* foi incentivada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com o intuito de proporcionar aos utilizadores um código computacional capaz de calcular não só a carga térmica de um edifício, mas também prever o seu desempenho energético, de modo a garantir uma abordagem mais completa [30] [31].

O programa foi editado em 2001, incorporando modelos para os vários componentes do edifício, desenvolvidos em todo o mundo devido ao carácter de código *Open Source*, e até ao momento já foi alvo de diversas atualizações. O programa foi sujeito a vários testes de validação, analíticos (comparando com soluções matemáticas), comparativos (comparando com outros programas), de sensibilidade (comparando pequenas alterações dos dados com uma base) e empíricos (comparando com dados experimentais) [30] [32]. O programa foi ainda validado de acordo com o procedimento descrito na norma ASHRAE 140-2007 [26]. Devido à dificuldade de validar as ferramentas de simulação, surgiu o método BEStest (*Building Energy Simulation test*), promovido pela IEA (*Internacional Energy Agency*). Este método permite ao utilizador simular um conjunto de casos,

permitindo avaliar o nível de precisão da ferramenta de simulação utilizada, por comparação dos resultados, ver anexo A.

Posteriormente foi incluído no programa *EnergyPlus* o algoritmo COMIS (*An International Multizone Airflow and Contaminant Transport Model*) [33] que permite a simulação da ventilação natural juntamente com a simulação térmica do edifício, a partir da sua geometria, elementos construtivos e das condições climáticas do local de implantação.

O programa não inclui uma *Graphical User Interface* (GUI) para introdução dos dados de entrada. No entanto, existem inúmeras ferramentas no mercado que disponibilizam uma GUI para simplificar a criação de modelos para posterior simulação no programa *EnergyPlus*. No programa *DesingBuilder* podemos criar o ficheiro com os dados de entrada para o programa *EnergyPlus* (Input File com a extensão IDF).

O programa *EnergyPlus* tem uma estrutura modular permitindo o cálculo simultâneo das cargas térmicas e dos sistemas de AVAC. As cargas internas são determinadas a partir de um algoritmo de balanço térmico (HB - *Heat Balance Method*), baseiam-se no método, que assenta na transformação do ganho de calor de todas as fontes em carga térmica, e enviadas para o módulo de simulação dos sistemas. Este procedimento é realizado iterativamente em todos os incrementos de tempo definidos pelo utilizador. Este modelo de simulação integrada do edifício e dos sistemas de AVAC permite resultados mais rigorosos na previsão da temperatura nos espaços. A figura 2.6 traduz esquematicamente este procedimento.

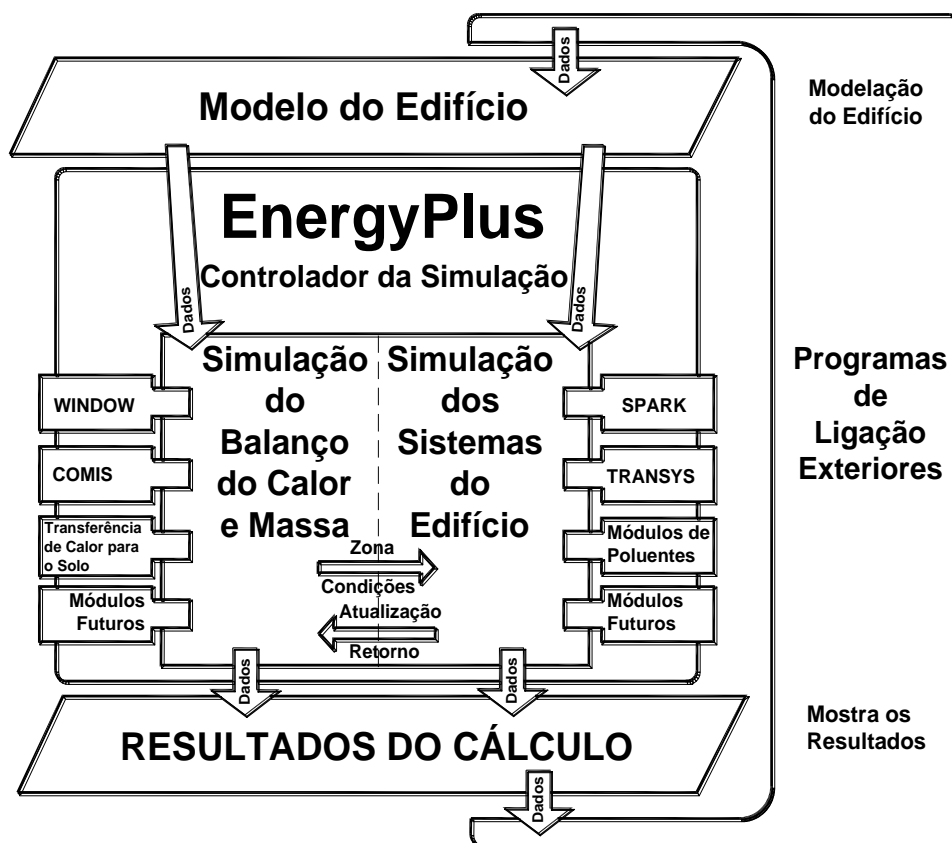


Fig.2.6. – Estrutura modular do programa *EnergyPlus*, adaptado de [30] [34]

O módulo de simulação controla todo o processo, fornecendo os dados de entrada (informação) e ligando os outros módulos (incluindo ligações a outros programas). O módulo de balanço térmico e de

massa aplica os princípios de conservação de massa e energia para calcular a transferência de energia através de uma zona. O módulo de simulação dos sistemas lida com a comunicação entre a equação de balanço térmico e os módulos dos sistemas AVAC (chillers, bombas de calor e outros equipamentos/componentes). Este módulo não limita o utilizador à seleção de um sistema pré-definido, permitindo a simulação de um qualquer sistema [32]. O diagrama da figura 2.7 apresenta a integração destes módulos internos no programa principal [34].

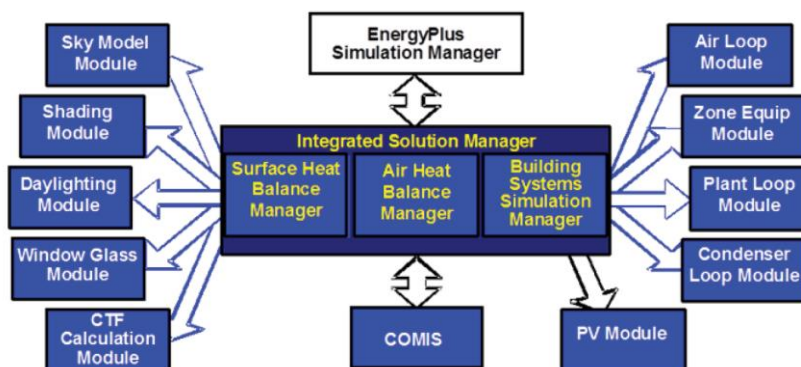


Fig.2.7. – Programa *EnergyPlus*: módulos internos, adaptado de [34]

O modelo de balanço térmico tenta traduzir os princípios básicos da transferência de calor em elementos da envolvente, através da aplicação da lei de conservação de energia a pontos notáveis da geometria do edifício. Esta formulação é aplicada considerando elementos de volume na face exterior de cada superfície do edifício, na face interior de cada superfície do edifício e no interior de cada zona (compartimento) definida pelo utilizador [35]. A figura 2.8 representa graficamente o modelo.

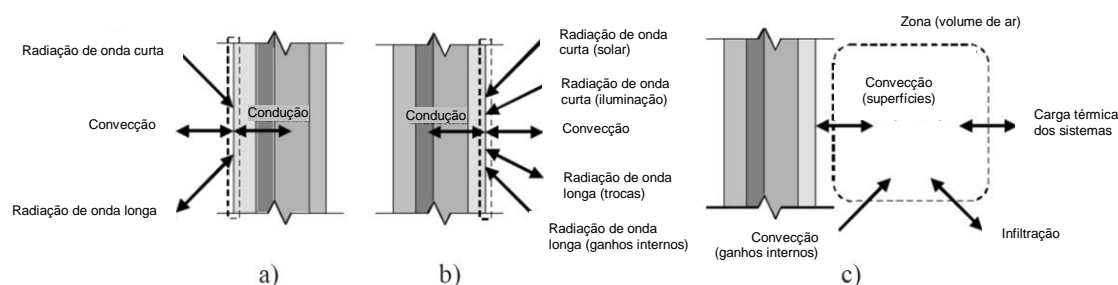


Fig.2.8. – Modelo de balanço térmico. a) superfície exterior; b) superfície interior; c) zona, adaptado de [30] [35]

O programa *EnergyPlus* é atualmente utilizado em Portugal na aplicação do RECS [8], na verificação dos consumos energéticos dos grandes edifícios com sistemas de climatização.

#### 2.1.3.4. Programa DesignBuilder

O programa *DesignBuilder* [11] e [36] combina as vantagens de uma interface gráfica intuitiva e acessível para o utilizador, figura 2.9, com a vantagem de utilizar um algoritmo de cálculo validado, o do programa *EnergyPlus*. Apresenta inúmeras vantagens quanto à facilidade de modelagem em relação ao programa *Energyplus* [10].

O programa *DesingBuilder* possui uma biblioteca (*Libraries*) com configurações pré-definidas de materiais e elementos construtivos, atividades e sistemas de iluminação e climatização. Também é possível criar bibliotecas personalizadas e utilizá-las nas simulações.

Para executar a simulação, tanto o programa *Designbuilder* como o programa *EnergyPlus* necessitam que o utilizador introduza dados de entrada, “inputs”, relativamente à descrição e constituição do edifício, bem como um ficheiro climático. O ficheiro climático designado por “*Weather file*”, descreve o meio ambiente que rodeia a edificação.

Relativamente a dados de entrada, “inputs”, estes são fornecidos pelo utilizador através de menus elementares. São exemplo de dados de entrada: as características de envolvente, ou seja, de materiais que constituem o tipo de construção; atividades, ocupações e iluminação; e ainda sistemas de AVAC para a eventualidade da existência destes. É ainda permitido modificar ou corrigir estes dados a qualquer instante a nível geral do edifício ou a nível particular de uma só zona que tenha características peculiares.

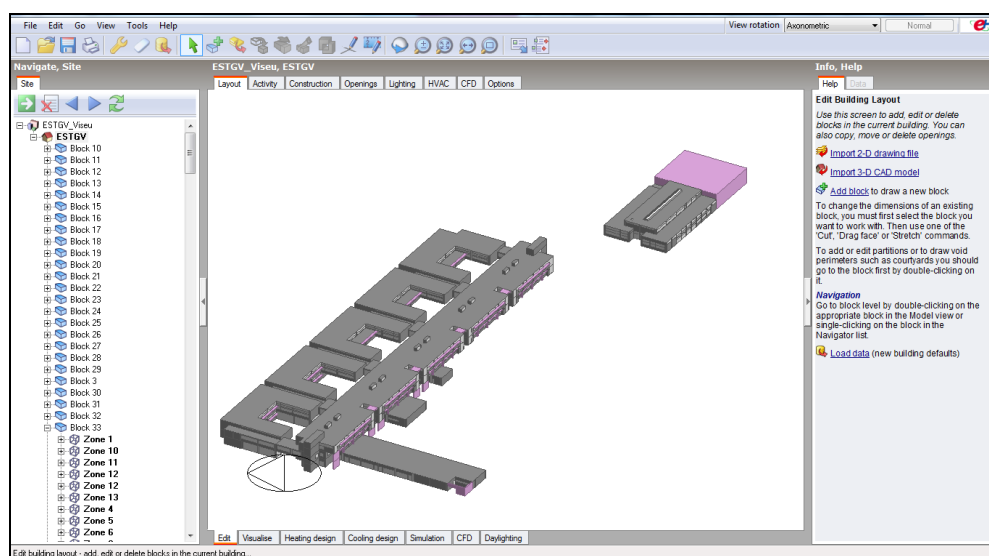


Fig.2.9. – Interface gráfica do programa *DesignBuilder*

Os parâmetros de saída, “outputs”, permitem analisar uma panóplia de resultados, podendo estes ser detalhados até intervalos inferiores à hora. Estes intervalos, somente apresentam a desvantagem de tornar a simulação mais morosa.

## 2.2. CONFORTO TÉRMICO

### 2.2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE CONFORTO

Como qualquer organismo vivo, o ser humano produz e troca calor com o meio ambiente envolvente. O ambiente envolvente tem um efeito físico e psicológico no indivíduo sendo de grande importância para o projeto de edifícios. O estudo do comportamento térmico dos edifícios tem como um dos objetivos principais o conforto térmico dos seus utilizadores.

Como qualquer outra noção de conforto, resultante de sensações humanas onde intervêm fatores meramente subjetivos, também a noção de conforto térmico em edifícios não será de fácil definição [17]. De um ponto de vista geral, a sensação de conforto térmico pode ser definida como “*o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico*” [37]. Por outras palavras, um indivíduo está termicamente confortável quando não sente nem calor nem frio de modo a distraí-lo das suas atividades de momento. A exigência básica para que tal aconteça é a de que o sistema termorregulador do corpo humano se encontre em equilíbrio com o ambiente envolvente, isto é, que num dado momento existe um equilíbrio entre as trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente.



Existem vários parâmetros que podem conduzir ao desconforto térmico, o calor em excesso afeta o bem-estar e o desempenho laboral das pessoas, causa inquietação e ainda perda de concentração. Este tipo de perturbações em conjunto com outros fatores de origem ambiental, muitas vezes, causa aquilo a que se chama Stress. O Stress provoca nas pessoas, traumas e eventualmente alguns tipos de patologias clínicas. As consequências para o organismo poderão muitas vezes tornar-se graves e difíceis de eliminar. Implicam quase sempre, recurso a vários tipos de especialidades terapêuticas, tratamentos, e podem deixar, muitas vezes lesões permanentes no organismo.

Uma das principais exigências para o bem-estar e conforto térmico do ser Humano é existir um equilíbrio térmico entre o corpo humano e o meio ambiente, conservando a temperatura interior do corpo a uma temperatura constante de cerca de  $37,0 \pm 0,8$  °C (no cérebro), independentemente das variações das condições ambientes, ASHRAE Fundamentals [38].

Quando ocorre uma modificação da temperatura do corpo, essa informação é fornecida por impulsos nervosos através de sensores de temperatura presentes no cérebro e na pele, ao hipotálamo, que desencadeia processos fisiológicos de termorregulação que levam ao reajuste da temperatura corporal. De forma automática com vista à manutenção do equilíbrio térmico, pode ser complementada por diversas ações voluntárias tais como: alterações da quantidade de roupa vestida, da postura adotada, da atividade desenvolvida, ingestão de bebidas e, ainda, das condições ambientais através da interação com o edifício e os seus sistemas.

A obtenção do equilíbrio térmico é apenas uma condição necessária, mas não suficiente para se atingir o conforto térmico, já que o equilíbrio térmico pode ser alcançado sob condições de desconforto, graças aos mecanismos de termorregulação do corpo humano.

No entanto, sempre que as condições ambientes e individuais conduzam a um estado de equilíbrio térmico, sem pôr em funcionamento os processos fisiológicos de termorregulação, diz-se que existe uma situação de neutralidade térmica, na qual um indivíduo não sente nem calor nem frio, corresponde "*as condições para as quais os mecanismos termo-reguladores do corpo humano se encontram num estado de atividade mínima*" [4].

Essa interação térmica pode efetuar-se através dos seguintes modos:

- Condução (*U*): calor trocado através do contacto direto das partes do corpo com elementos da envolvente;
- Convecção (*C*): calor trocado entre a pele/roupa e o ar envolvente; depende das temperaturas da superfície corporal e do ar e da velocidade do ar;
- Radiação (*R*): calor trocado entre a pele/roupa e as superfícies envolventes (paredes, pavimentos, vãos envidraçados, aquecedores, etc.), depende das temperaturas das superfícies envolvidas;
- Respiração (*Res*): calor trocado através do ar que se inspira e o ar que se expira;
- Evaporação (*E*): calor dissipado para o ambiente pela evaporação de água à superfície da pele.

A produção de energia do corpo humano é obtida pelo seu organismo através de transformações químicas a nível celular, em que os alimentos são sintetizados (processo de metabolismo), segundo uma taxa de metabolismo, *M*, que depende de cada indivíduo, da sua atividade física e das condições nas quais é desenvolvida a própria atividade. Da energia produzida pelo corpo humano só uma pequena parte é convertida em trabalho mecânico muscular, *W*, sendo a maior parte dissipada sob a forma de calor, *H*, conclui-o Fanger em 1970 [39].

Tendo em conta a energia produzida pelo organismo humano e os diferentes modos de trocas térmicas atrás referidos, a equação geral que gere o processo termodinâmico das trocas de calor (balanço energético) entre o corpo humano e o meio ambiente define-se da forma seguinte, Fanger em 1970 [39]:

$$\text{Acumulação de calor no corpo (S)} = M - W - E \pm U \pm R \pm C \pm Res \quad (2.1.)$$

As trocas por condução, convecção, e radiação podem ser avaliadas com base na teoria da transferência de calor e usando coeficientes apropriados determinados experimentalmente, calor sensível. As trocas devidas à evaporação correspondem ao estado natural de humidade do corpo e resultam da mobilização do calor latente de vaporização [17].

Para manter o equilíbrio térmico, *neutralidade térmica*, o balanço energético entre o corpo humano e o ambiente circundante terá de ser nulo, ( $S = 0$ ), isto é, uma inexistente quantidade de calor acumulado no corpo.

Na figura 2.10 representa-se a interação térmica entre o corpo humano e o ambiente que o envolve, descrita na equação, 2.1.

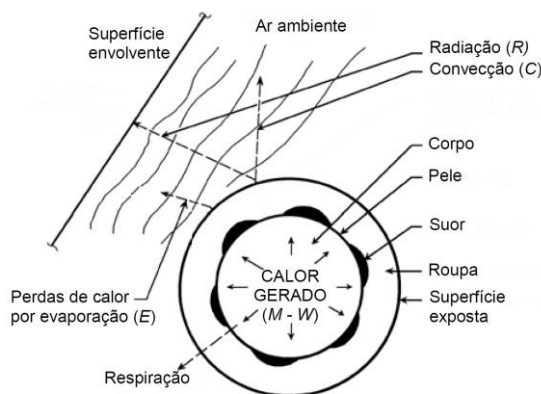


Fig.2.10. – Interação térmica do corpo humano com o ambiente, adaptado de [4]

#### 2.2.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O CONFORTO TÉRMICO

Na fase de conceção do projeto, podem deduzir-se quais as variáveis que há que ter em conta para a especificação de condições de conforto térmico dos ocupantes.

As sensações térmicas do ser Humano referem-se principalmente ao estado térmico (balanço térmico) da globalidade do seu corpo, sendo este estado influenciado por parâmetros físicos, que se podem subdividir em [21] [37] [40]:

##### i) Parâmetros ambientais:

- Temperatura do ar ambiente ( $T_a$ ) - que está associada a todas as trocas de calor sensível por convecção;
- Temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) - que está associada a todas as trocas de calor por radiação;
- Velocidade do ar ( $v_a$ ) - que está ligada à grandeza dos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção;

- Humidade absoluta do ar ou pressão parcial do vapor de água ( $p_a$ ) - que está associada a todas as trocas de calor latente.

ii) Parâmetros individuais (dependentes do indivíduo):

- Atividade metabólica ( $M$ ) - que determina a grandeza do calor total a dissipar para manter o equilíbrio térmico;
- Resistência térmica da roupa ( $R_r$ ) - que está associada à grandeza do fluxo de calor dissipado pela porção coberta da pele;
- Aclimação – que está associada a parâmetros psicossociais - de natureza psicológica e sociológica.

Relativamente ao primeiro fator individual, a atividade metabólica, refira-se que a atividade física desenvolvida por um indivíduo pode ser quantificada pela taxa de metabolismo,  $M$ , que representa a energia produzida pelo organismo. A unidade utilizada para a taxa de metabolismo é designada por “*met*”, correspondendo 1 met (situação de repouso, acordado) a uma produção de calor por unidade de superfície do corpo humano igual a  $58,2 \text{ W/m}^2$  [37] [40].

No que diz respeito ao segundo fator individual, o vestuário, salienta-se que este constitui uma resistência térmica que dificulta as trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente. A resistência térmica convencional do vestuário,  $I_{cl}$ , expressa-se numa unidade denominada de “*clo*”, sendo 1 *clo* (vestuário típico para inverno) equivalente a uma resistência térmica de  $0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ . Essa resistência térmica pode ser obtida pelo somatório da resistência térmica de cada peça de vestuário que um indivíduo utiliza [37] [40].

No entanto, além dos parâmetros físicos, outros de carácter mais subjetivo (parâmetros psicossociais - de natureza psicológica e sociológica, nomeadamente, sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso, altura, adaptação ecológica às regiões, extrato socio-cultural, etc.) condicionam também de forma significativa a percepção de conforto térmico experimentada por um indivíduo num dado ambiente.

## 2.2.3. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO

### 2.2.3.1. Considerações Gerais

A forma mais simples de especificar as condições do ambiente interior é através da temperatura do ar registada por um termómetro. Se este estiver colocado num compartimento onde o ar, as paredes, o pavimento e o teto assumam todos a mesma temperatura, as condições de avaliação dos parâmetros térmicos são consideradas satisfatórias. No entanto, por vezes é impossível encontrar, ao nível da temperatura, tais condições de uniformidade.

Numa sala aquecida, a existência de “uma radiação fria” proveniente de um vão envidraçado, significa que uma pessoa que esteja presente na sala perde para o vidro a um ritmo superior ao que perde para as outras superfícies, provocando a necessidade de se aumentar a temperatura do ar, ou de providenciar alguma forma de aquecer por radiação a superfície do vidro. Nestas condições, a temperatura do ar não é suficiente para caracterizar as condições de conforto térmico locais, uma vez que apresenta valores distintos aos das temperaturas das superfícies circundantes.

Embora a nível qualitativo possa parecer fácil avaliar o grau de conforto térmico num dado ambiente interior, a avaliação quantitativa é certamente bastante mais complexa.

Ao longo dos tempos, numerosas tentativas foram feitas para identificar um parâmetro térmico - obtido diretamente por medição (temperatura do ar, temperatura de bolbo húmido) ou por cálculo

(temperatura média radiante, temperatura operativa) – ou definir um índice térmico que permitisse caracterizar globalmente um dado ambiente térmico, de forma a especificar as condições de conforto térmico aí existentes.

No passado foram desenvolvidos inúmeros índices térmicos, com diferentes objetivos, de modo a permitir estimar as condições ambientes ou as condições de conforto térmico para o ser humano.

Um primeiro conjunto de índices, cuja função específica era avaliar as condições térmicas extremas em ambientes interiores (stress térmico), pretendia limitar as condições mínimas aceitáveis para utilizadores de locais de trabalho sujeitos a altas temperaturas [39].

Num segundo conjunto, incluíam-se índices que pretendiam, dentro de certos limites, combinar numa única variável, a influência de dois ou mais parâmetros ambientais influentes na perceção térmica, podendo ser classificado como analítico, quando é desenvolvido com base na teoria fisiológica, ou empírico (baseia-se em medições efetuadas com pessoas em condições reais não controladas), consoante o seu modo de desenvolvimento. Em apoio à definição destes índices foram também desenvolvidos vários instrumentos (sondas e manequins térmicos) [39].

#### 2.2.3.2. Índices Analíticos

Os índices térmicos desenvolvidos com base em modelos analíticos do balanço térmico do corpo humano são o resultado do esforço considerável desenvolvido, principalmente, na década de 1960. Obtidos através da avaliação subjetiva das condições de conforto de indivíduos expostos a ambientes, designados por câmaras climáticas, em que é possível ajustar as variáveis ambientais, como a temperatura, velocidade e humidade do ar e temperatura das superfícies. Os dois modelos mais utilizados na área do conforto térmico em ambientes interiores controlados surgiram por volta de 1970 e são designados por modelo de Fanger e por modelo bi-nodal de Gagge [41] [42].

Estes modelos são relativamente simples tendo em conta que utilizavam uma aproximação unidimensional do corpo humano e das trocas de calor entre este e o meio ambiente.

Outros modelos mais complexos têm sido desenvolvidos – modelos que consideram o corpo constituído por centenas de segmentos e utilizam algoritmos sofisticados (modelo de Wissler; 1985), ou modelos de elementos finitos (modelo Smith-Fu; 1995) – e têm tido alguma aplicação na investigação do conforto humano [43].

Fanger desenvolveu uma equação de equilíbrio térmico com base na premissa de ser possível definir o estado de conforto térmico, em termos físicos, centralizando-o no corpo humano e não no ambiente circundante. Assim, considera que um indivíduo expressa a sua sensação térmica em função da temperatura da sua pele e não da temperatura do ar circundante.

Para esse efeito, Fanger apontou três requisitos necessários para se obter o conforto térmico [39]:

- O corpo humano tem de estar em equilíbrio térmico, de modo a que a taxa de perda de calor para o meio ambiente seja igual à taxa de produção de calor o que implica condições estacionárias;
- A temperatura superficial da pele deve ter um valor apropriado para uma situação de conforto; a sensação térmica está relacionada com a temperatura cutânea que, por sua vez, é dependente da atividade;
- Existe uma taxa preferencial de sudação ao nível da pele que também é função da taxa metabólica.

Considerando estes princípios, já apontados previamente por Yaglou em 1949, e utilizando resultados de estudos efetuados nos EUA, Fanger obteve relações quantitativas entre a temperatura cutânea de conforto, a taxa de evaporação desejável e a atividade metabólica.

Combinando as referidas relações com a equação de equilíbrio térmico, Fanger deduziu uma complexa equação geral de conforto, que abrange uma gama de variáveis mais alargada do que em anteriores tentativas.

Relacionando a equação geral de conforto com as sensações térmicas recolhidas nos numerosos ensaios em laboratório realizados (de 1396 pessoas), Fanger estabeleceu um índice térmico denominado voto médio previsível “*Predicted mean Vote*”, PMV. A obtenção do índice PMV consistiu na adaptação da solução da equação de equilíbrio térmico entre o corpo Humano e o ambiente aos resultados experimentais e permite caracterizar a sensação térmica de um indivíduo a partir da estimativa dos fatores individuais (atividade e vestuário) e da medição dos fatores ambientais ( $T_a$ ,  $T_{mr}$ ,  $HR$  e  $v_a$ ). A escala de sensação térmica utilizada nesses ensaios era constituída por sete níveis, variando entre -3 (Muito Frio) e +3 (Muito Quente), no quadro 2.1, na qual o zero (termo central) representava a neutralidade térmica (Neutro) [39] [41].

Quadro 2.1. - Escala de sensação térmica, adaptado de [37]

Escala	Sensação térmica
+3	<i>Hot</i> (Muito quente)
+2	<i>Warm</i> (Quente)
+1	<i>Slightly warm</i> (Ligeiramente quente)
0	<i>Neutral</i> (Neutro)
-1	<i>Slightly cool</i> (Ligeiramente frio)
-2	<i>Cool</i> (Frio)
-3	<i>Cold</i> (Muito frio)

De modo a estimar a quantidade de pessoas que não se considerariam confortáveis no ambiente em análise, Fanger, definiu um segundo índice térmico, designado por percentagem previsível de insatisfeitos “*Predicted Percentage Dissatisfied*”, PPD (%). O índice PPD procura então estabelecer uma previsão da percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições térmicas, isto é, a percentagem de pessoas que escolheriam uma determinada sua sensação térmica. A partir do índice PMV, pode determinar-se o índice PPD através da equação representada graficamente na figura 2.11.

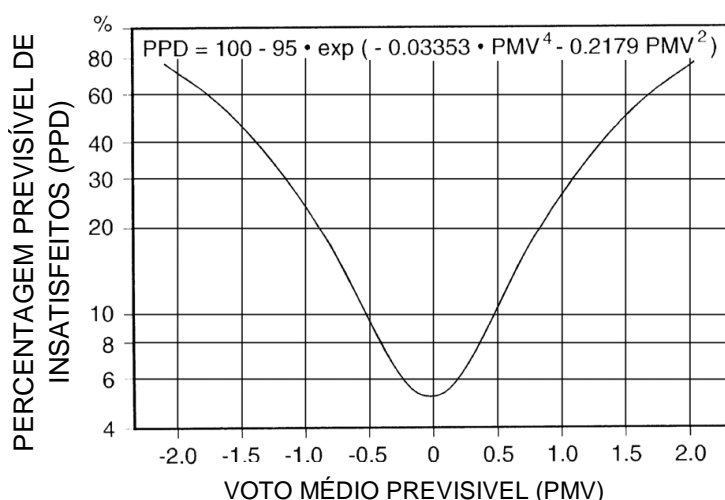


Fig.2.11. - PPD em função de PMV, adaptado de [37]

Em face das diferenças entre indivíduos é impossível especificar condições de conforto que satisfaçam em simultâneo todos os ocupantes, haverá sempre uma percentagem mínima de 5% de ocupantes insatisfeitos. Num determinado meio ambiente considera-se que as pessoas expostas a uma dada combinação de variáveis se encontram em condições aceitáveis de conforto térmico para valores de PMV compreendidos entre -0,5 e +0,5 e para PPD inferiores a 10% [37].

O modelo proposto por Fanger apresenta restrições de aplicação em ambientes não climatizados. Para contornar esta limitação em 2002 Fanger e Tufton propõem o modelo estendido para climas quentes, em que o índice PMV é multiplicado por um fator de expectativa ( $e$ ), que pode variar entre 0,5 e 1 (para edifícios climatizados  $e = 1$ ). Para edifícios não climatizados este fator depende da duração da estação quente, assim como da existência de edifícios climatizados na vizinhança e o seu número [44].

O modelo PMV atualmente é usado para avaliar e prever o conforto térmico em espaços fechados, principalmente escritórios. O modelo, no entanto, é promissor para outras aplicações que vão além do objetivo inicial, como a otimização da produtividade. Mas, as interações exatas entre as variáveis consideradas pelo modelo ainda não são totalmente compreendidas, sendo objeto de muitos estudos com condições térmicas variáveis [40].

Os parâmetros ambientais devem ser obtidos de acordo com o especificado na Norma Europeia EN ISO 7 726:2001 [45]. A norma define também o posicionamento dos equipamentos de medição dos parâmetros ambientais, em função da posição do ocupante (sentado ou de pé), figura 2.12.

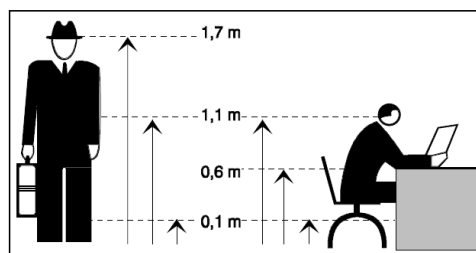


Fig.2.12. – Posicionamento das sondas e dos transdutores de medição, adaptado de [4]

Os índices térmicos analíticos PMV e PPD constituem desde 1984 a base da Norma ISO 7 730:2005 [39] e, atualmente, também são considerados na Norma Americana ASHRAE 55:2010 [37] e na Norma Europeia EN 15 251:2007 [46].

### 2.2.3.3. Modelos Adaptativos

Em alternativa aos métodos analíticos existem métodos empíricos que mais tarde deram origem aos modelos adaptativos cujo desenvolvimento se baseia em estudos de campo (condições reais não controladas), nos quais são registadas as condições ambientes (obtidas por medições) e as votações de perceção térmica inquiridas aos ocupantes do espaço em estudo [4]. Sendo que a hipótese fundamental da abordagem adaptativa é expressa pelo princípio adaptativo: “*Se ocorre uma mudança que provoque desconforto, as pessoas reagem de uma forma que tende a restaurar o seu conforto*”. O princípio corresponde na prática às seguintes ações (ou oportunidades de adaptação) [47]:

- Ajustamentos na temperatura de conforto através de mudanças no vestuário, atividade, postura, ingestão de bebidas, etc., de modo a que os ocupantes se sintam confortáveis sobre as condições prevalentes;

- Ajustamentos nas condições interiores através do uso ou controlo de janelas/portas, sombreamentos e ventiladores. Os ocupantes também podem deslocar-se no interior do compartimento de modo a obterem melhores condições.

Este tipo de abordagem tem em conta que a percepção térmica Humana é influenciada, além dos fatores relacionados com o balanço térmico do corpo humano, pelos parâmetros climáticos, por condicionamentos sociais, considerações económicas e outros fatores contextuais Brager e De Dear em 1998 [48].

É possível distinguir três categorias de adaptação térmica, que envolvem todas as ações que permitem melhorar a exposição ao meio ambiente, nomeadamente, Brager [48], De Dear [49] [50] e LNEC [51]:

- Comportamentais (ajustamentos): ações conscientes ou inconscientes para manter o equilíbrio térmico, as quais podem ser de carácter pessoal, tecnológico ou cultural;
- Fisiológicos (adaptação genética aclimatação): respostas biológicas a exposições prolongadas com condições térmicas extremas (alteração das temperaturas internas a partir das quais funciona a termorregulação);
- Psicológicos (habituação ou expectativas): atenuação/controlo da percepção das condições físicas devido a experiências do passado e expectativas existentes relativamente às condições ambientais.

O grau de possibilidade de desenvolvimento de uma determinada ação adaptativa varia, sendo essa variação classificada através da oportunidade adaptativa, conceito desenvolvido por Baker e Standeven em 1996 [4]. A Figura 2.13 ilustra este conceito mostrando como uma gama alargada de temperaturas é admissível quando a oportunidade adaptativa aumenta.

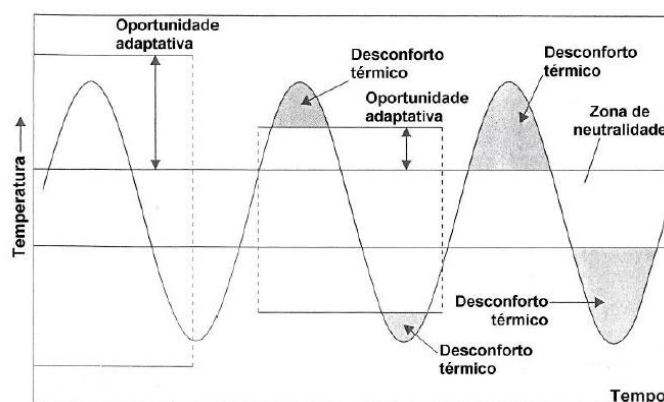


Fig.2.13. – Efeito da oportunidade adaptativa, adaptado de [4]

A oportunidade adaptativa (adaptação térmica) permite, então, uma extensão da zona de neutralidade térmica, que depende de vários fatores relacionados, com o clima (climas temperados maior possibilidade de adaptação do que em climas extremos), com o poder económico (custos relacionados com a instalação e uso de sistemas de controlo), com a arquitetura do edifício e, finalmente, dos hábitos sociais, culturais e organizacionais.

A comparação entre a sensação de conforto obtida em situações reais e o modelo PMV tem demonstrado discrepâncias de resultados. Por norma, o modelo PMV sobrestima o desconforto. Como foi referido anteriormente a sensação de conforto não corresponde a um simples balanço de energia, além da componente sensorial existe também a componente psicológica. No modelo PMV existe sempre uma percentagem mínima de insatisfeitos (no mínimo 5%), esta discrepância pode ser

explicada pela não contabilização de alguns fatores no modelo ou pelos erros na contabilização da atividade e vestuário ou simplesmente por ser um modelo estático [21].

Os modelos analíticos de conforto baseiam-se em medições em estado estacionário, considerando os ocupantes reagindo de forma passiva ao estímulo térmico. Todos os dias as experiências mostram que apesar disso a temperatura ideal não é constante. A temperatura depende da atividade metabólica e da resistência térmica da roupa dos ocupantes e, por isso, deveria variar de acordo com estes fatores. Se tiverem oportunidade, os ocupantes alterarão a temperatura ambiente interior de modo a adequá-la às suas preferências e vice-versa, adaptam-se à temperatura ambiente alterando o tipo de roupa que vestem ou adaptando a sua atividade. Adicionalmente, os ocupantes aceitam variações de temperatura superiores num ambiente do que noutros [52].

De modo a tentar entrar em conta com outros fatores, além do simples balanço térmico, têm-se desenvolvido modelos adaptativos em que a principal variável é a temperatura exterior. Na Norma Americana ASHRAE 55:2010 [37] define-se modelo adaptativo como “*um modelo que relaciona a temperatura interior ou a gama de temperaturas aceitáveis com o clima exterior*”. Na Norma Americana ASHRAE 55:2010 [37] e na Norma Europeia EN 15 251:2007 [46] são descritos dois modelos adaptativos, sendo desenvolvidos por intermédio de estudos realizados em condições reais e aplicam-se principalmente à estação de arrefecimento e a edifícios ventilados naturalmente, em que os ocupantes têm atividades sedentárias, têm também possibilidade de adaptar o vestuário às condições térmicas interiores e exteriores e acesso e controlo ao uso de janelas. Em edifícios residenciais as oportunidades de adaptação são particularmente livres e fáceis de conseguir, nomeadamente, através da alteração da atividade metabólica e do vestuário. À semelhança do modelo PMV, também neste caso a normalização existente especifica classes de conforto.

Na norma ASHRAE 55:2010 [37] é apresentado um modelo gráfico de conforto térmico, figura 2.14, que relaciona a temperatura operativa de conforto,  $T_{oc}$ , com a temperatura exterior média mensal,  $T_m$ , tendo Brager, Paliaga e De Dear em 2004 [49] proposto a equação, 2.2, que é a base deste modelo.

$$T_{oc} = 0,31.T_m + 17,8 \quad (2.2.)$$

em que:

$T_{oc}$  Temperatura operativa de conforto (°C);

$T_m$  Temperatura exterior média mensal (°C);

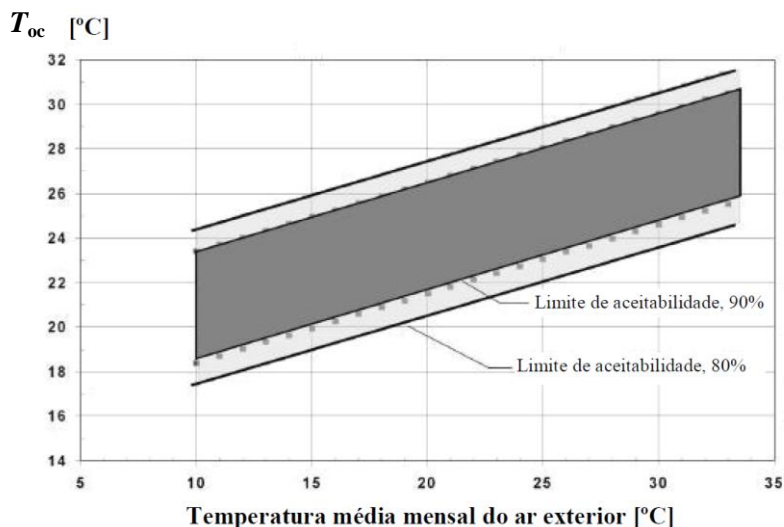


Fig.2.14. – Modelo adaptativo de conforto térmico, adaptado de [37]



O modelo considera duas classes de conforto correspondendo a 80% e 90% de aceitação/satisfação dos utilizadores.

Para definir a zona de conforto do modelo gráfico foram estabelecidas variações dos valores para a temperatura operativa de conforto,  $T_{oc}$ , de  $\pm 3,5$  °C para 80% de aceitabilidade e de  $\pm 2,5$  °C para 90% de aceitabilidade.

A norma EN 15 251:2007 [46] propõe um método adaptativo para a definição das condições aceitáveis de conforto térmico (ACA – *Adaptive Control Algorithm*), para edifícios sem sistemas de climatização de arrefecimento, que tem por base os resultados obtidos no projeto SCATs (*Smart Controls and Thermal Comfort*) [3]. O projeto SCATs, desenvolveu um método adaptativo para países europeus, realizando campanhas experimentais em Portugal, França, Suécia e Reino Unido. O objetivo final do projeto SCATs era encontrar uma equação que possibilitasse o cálculo de conforto térmico em função do clima exterior [53].

O modelo gráfico proposto pela norma EN 15 251:2007 [46], figura 2.15, que relaciona a temperatura operativa de conforto,  $T_{oc}$ , com a temperatura exterior exponencialmente ponderada,  $T_{mp}$ , através da equação, 2.3.

$$T_{oc} = 0,33.T_{mp} + 18,8 \quad (2.3.)$$

em que:

$T_{oc}$  Temperatura operativa de conforto (°C);

$T_{mp}$  Temperatura exterior média exponencialmente ponderada dos últimos 7 dias (°C).

Para Portugal, foi encontrada equação, 2.4, para a temperatura operativa de conforto,  $T_{oc}$ , em função da temperatura exterior exponencialmente ponderada,  $T_{mp}$ .

$$T_{oc} = 0,381.T_{mp} + 18,12 \quad (2.4.)$$

A temperatura exterior média exponencialmente ponderada caracteriza de uma forma exponencial as temperaturas exteriores médias dos 7 dias anteriores ao dia do estudo do conforto térmico, podendo ser calculada através da equação, 2.5.

$$T_{mp} = \frac{(T_{n-1} + 0,8.T_{n-2} + 0,6.T_{n-3} + 0,5.T_{n-4} + 0,4.T_{n-5} + 0,3.T_{n-6} + 0,2.T_{n-7})}{3,8} \quad (2.5.)$$

em que:

$T_{n-i}$  Temperatura exterior média do dia (i) anterior (°C).

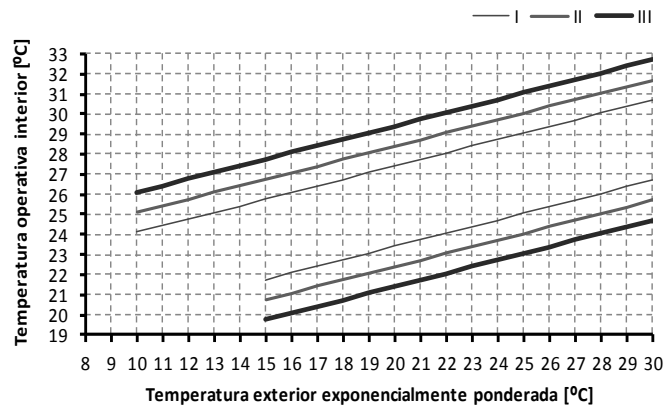


Fig.2.15. - Modelo adaptativo de conforto térmico, adaptado de [46]

A figura 2.15 representa graficamente a gama de temperatura operativa de conforto aceitável para a estação de arrefecimento para diferentes categorias de edifícios (de serviços, com atividades principalmente sedentária e de habitação) sem sistemas mecânicos de arrefecimento, onde o acesso e possibilidade de abertura de janelas é fácil e os seus ocupantes podem, livremente, adaptar o seu vestuário às condições ambientes interiores e (ou) exteriores.

Está dividida em quatro categorias de conforto (I, II, III, IV), de acordo com o grau de exigência desejado de conforto térmico (percentagem de satisfeitos exigida), cada categoria apresenta uma gama aceitável de temperaturas, representadas no quadro 2.2, que representam o afastamento em torno da temperatura operativa de conforto,  $T_{oc}$ , para edifícios com sistemas mecânicos de climatização (aquecimento e arrefecimento).

A categoria I representa um ambiente térmico de elevado nível de expectativa (usada em espaços ocupados por pessoas com necessidades especiais) e corresponde a 94% de satisfeitos. A categoria II representa um ambiente térmico de expectativa normal (usada em edifícios novos ou sujeitos a ações de reabilitação) e corresponde a 90% de satisfeitos. Já a categoria III representa um ambiente térmico de expectativa normal (usada em edifícios já existentes) e corresponde a 85% de satisfeitos. A categoria IV representa um ambiente térmico fora das expectativas anteriormente referidas por períodos limitados.

A observação da figura 2.15, realça que a possibilidade de adaptação permite obter temperaturas de conforto mais elevadas, podendo dispensar assim o recurso a meios mecânicos de climatização, bem como uma gama de variações mais alargada.

Salienta-se que os valores apresentados são indicados para situações de verão (estação de arrefecimento) e que esses valores, para temperaturas exteriores superiores a 25 °C, se basearam numa base de dados de resultados bastante limitada [46].

Quadro 2.2. – Gama de temperaturas aceitáveis para cada categoria de ambiente térmico, adaptado de [46] [54]

Categoria	Conforto Global			
	Gama aceitável ( $T_{oc}$ )	PMV	PPD [%]	$T_{oc}$ [°C] <sup>(1)</sup>
I	± 2 °C	±0,2	< 6	21,0      25,5
II	± 3 °C	±0,5	< 10	20,0      26,0
III	± 4 °C	±0,7	< 15	19,0      27,0
IV	-	-	> 15	-      -

(1) Edifícios escolares e escritórios: atividade sedentária (1,2 met)

Este modelo é especialmente indicado para a estação de arrefecimento (verão), sendo a sua utilização viável para a estação de aquecimento (inverno). Para esse efeito, quando as temperaturas exteriores exponencialmente ponderadas forem inferiores a 10 e 15 °C, respetivamente, os valores dos limites superiores e inferiores que delimitam a zona de conforto térmico podem ser considerados tal como se o edifício fosse climatizado [37] [55]. Os valores adotados são dependentes do tipo de edifício, da resistência térmica do vestuário e da taxa da taxa de metabolismo e independente das condições térmicas exteriores, para essa gama de temperaturas, partindo do pressuposto que na estação de aquecimento, quer o edifício tenha ou não um sistema mecânico de arrefecimento, terá sempre um sistema de aquecimento ativo [53].

No quadro 2.3 são apresentados valores mínimos e máximos para a temperatura de conforto calculadas de acordo com o modelo adaptativo do projeto SCATs para as cidades do Porto, Lisboa e Évora [56].

Quadro 2.3. – Valores mínimos e máximos para a temperatura de conforto calculadas de acordo com o modelo adaptativo do projeto SCATs, adaptado de [56]

Cidade	Máxima [°C]	Mínima [°C]
Porto	26,7	21,0
Lisboa	27,4	21,3
Évora	27,7	20,9

Nestes modelos o parâmetro mais utilizado para caraterizar o conforto térmico para o ambiente interior é a Temperatura Operativa ( $T_{op}$ ), introduzido por Winslow, Herrington e Gagge em 1937 [17].

A temperatura operativa (*Operative Temperature*) é considerada na Norma Europeia EN ISO 7 730:2005 [40] na Norma americana ASHRAE 55:2010 [37] e na Norma Europeia EN 15 251:2007 [46].

A temperatura operativa ( $T_{op}$ ), resulta do reconhecimento da importância da radiação térmica do contorno nas condições de conforto, e define-se como a temperatura uniforme de um recinto fictício negro radiante, no qual o indivíduo sofre perdas por radiação e convecção iguais às do ambiente dado (não uniforme). A temperatura operativa é também definida como uma “temperatura resultante”, que engloba simultaneamente os efeitos de três variáveis que influenciam o conforto: temperatura do ar ambiente, temperatura média radiante e velocidade do ar. Desta definição, resulta para a temperatura operativa [39]:

$$T_{op} = \frac{T_a \cdot \sqrt{10 \cdot v_a} + T_{mr}}{1 + \sqrt{10 \cdot v_a}} \quad (2.6.)$$

em que:

- $T_{op}$  Temperatura operativa (°C);
- $T_a$  Temperatura do ar ambiente (°C)
- $T_{mr}$  Temperatura média radiante (°C);
- $v_a$  Velocidade do ar (m/s).

No caso mais geral, a temperatura operativa é dada pela expressão [17], [37]:

$$T_{op} = AT_a + (1 - A)T_{mr} \quad (2.7.)$$

em que a  $A$  é função da velocidade do ar.

Para valores correntes da velocidade do ar (<0,2 m/s), a expressão anterior reduz-se simplesmente a uma média entre a temperatura média radiante e a temperatura ambiente. Para locais com reduzidas assimetrias (isolamento homogéneo da envolvente e áreas de envidraçados exteriores não muito grandes), a temperatura operativa é aproximadamente igual à temperatura ambiente [17] ou com, aproximação suficiente, através da média aritmética da temperatura do ar e da temperatura média radiante [37].

A temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ), é a temperatura uniforme das superfícies envolventes de um espaço imaginário, onde a transferência de calor por radiação entre este espaço e um ocupante é igual à soma das transferências de calor por radiação não uniformes das superfícies envolventes de um espaço real, pode ser superior ou inferior à temperatura do ar no espaço considerado. Os métodos mais correntes para determinar a temperatura média radiante são: a medição direta (o método mais comum é o da temperatura de globo, medida por um globo negro com um sensor de temperatura no seu centro)

[43] e o cálculo, utilizando as temperaturas superficiais interiores da envolvente e do respetivo fator de forma em relação ao ocupante, que pode ser calculada com o recurso à expressão seguinte [42] [57] [58] [59] [60] [61]:

$$T_{mr} = \sum_{i=1}^N T_i F_{p-i} \quad (2.8.)$$

em que:

$T_{mr}$  Temperatura média radiante (°C);  
 $T_i$  Temperatura da superfície  $i$  (°C);  
 $F_{p-i}$  Fator de forma entre a pessoa e a superfície  $i$ , em que;

$$F_{p-i} = F_{\max} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-(a/b)}{\tau}\right) \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b/c}{\gamma}\right) \right]; \quad (2.9.)$$

$$\tau = A + B \frac{a}{c}; \quad (2.10.)$$

$$\gamma = C + D \frac{b}{c} + E \frac{a}{c}; \quad (2.11.)$$

A, B, C, D, E, e  $F_{\max}$  – são parâmetros que dependem da posição de cada superfície em relação à orientação (frente, costas, de perfil) e postura (sentado ou em pé) do ocupante. Os coeficientes a, b, e c são parâmetros que definem a geometria das superfícies interiores (largura, altura, e comprimento) em relação ao centro do ocupante.

Quando uma pessoa está sentada perto do vão envidraçado e exposta à radiação solar (direta e difusa), o cálculo da  $T_{mr}$  torna-se mais complexo, uma vez que se deve ter em conta não apenas a temperatura das superfícies interiores, mas também as componentes da radiação solar que incidem sobre a pessoa. Um algoritmo geral para calcular o  $T_{mr, solar}$  de um espaço interior, nestas circunstâncias, foi desenvolvido por Maria La Gennusa [6] [62] [63]:

$$T_{mr, solar} = \sum_{i=1}^N F_{p \rightarrow i} \cdot T_i + \frac{1}{\varepsilon_s \sigma} \left( \alpha_{irr, d} \sum_{j=1}^M F_{p \rightarrow j} I_{d, j} + \alpha_{irr, b} f_p I_b \right) \quad (2.12.)$$

O primeiro termo na expressão determina a  $T_{mr}$  devido às temperaturas das superfícies interiores. A segunda parte da expressão inclui o efeito da radiação solar que atinge o ocupante, onde  $\varepsilon_s$  é a emissividade do ocupante,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $\alpha_{irr, d}$ ,  $\alpha_{irr, b}$  são, respetivamente, a absorção difusa e direta do ocupante e  $I_d$  e  $I_b$  são os valores da radiação solar direta e difusa, respetivamente, que incidem no ocupante. O parâmetro  $f_p$  representa o fator de área projetada do sol sobre o ocupante. É uma função da altitude solar ( $\beta$ ), da orientação e postura do ocupante, e o ângulo de azimuth entre o ocupante e o sol ( $\alpha$ ). Um método para calcular o  $f_p$  foi desenvolvido por Gianfranco Rizzo em 1991 [64]:

$$f_p(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^4 A_i(\beta) \cdot \alpha^i \quad (2.13.)$$

em que:

$$A_i(\beta) = \sum_{j=0}^3 A_{ij} \cdot \beta^j \quad (2.14.)$$

O fator de forma pode ser obtido através da utilização dos gráficos executados por Fanger e dependem da posição e orientação das pessoas. Um exemplo desses gráficos pode ser observado na figura 2.16 [65] [66]. Também pode ser obtido por cálculo numérico [67].

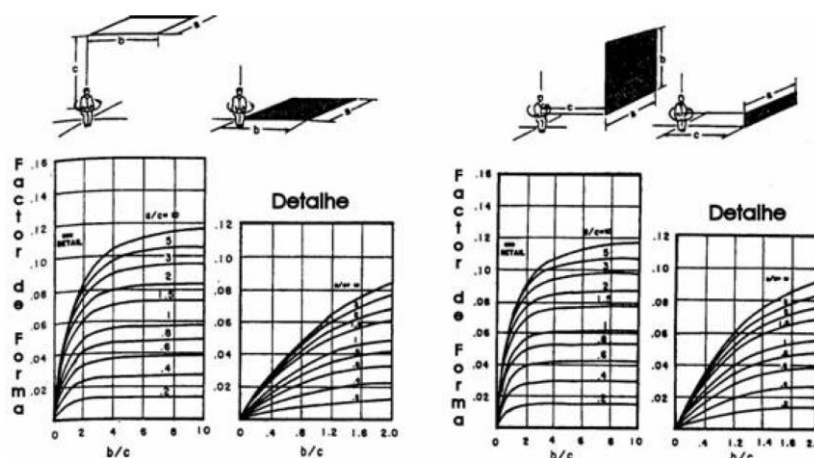


Fig.2.16. – Valor médio do factor de forma entre uma pessoa sentada e uma superfície horizontal ou vertical quando a pessoa pode ser rodada sobre um eixo vertical, adaptado de [66]

Humphreys em [68], conclui que a temperatura operativa é geralmente suficiente para caraterizar o conforto térmico para o ambiente interior, mas que podem ser feitas correções para velocidades do ar elevadas. Os dados mostram que é possível projetar e operar edifícios confortáveis sem instalar sistemas de climatização “free-running” quando a temperatura média exterior se encontra entre 10 °C e 30 °C.

A utilização das janelas é uma oportunidade adaptativa fundamental em edifícios ventilados naturalmente, especialmente no verão quando é provável que o prédio esteja sem sistema de climatização “free-running”, particularmente em climas quentes [69].

Salienta-se ainda que, tendo em conta a influência da velocidade do ar nas trocas de calor por convecção entre o corpo humano e o meio ambiente circundante, as três normas anteriores especificam que um aumento da velocidade do ar, com a utilização de ventilação natural ou de ventoinhas, permite atenuar a sensação de calor provocada por temperaturas elevadas, quando se avaliam as condições de verão [70] [71]. Segundo Fergus Nicol e Michael Humphreys [55], a utilização, por exemplo, de uma ventoinha de teto a funcionar de modo a garantir uma velocidade do ar de 1 m/s permite considerar uma temperatura operativa de conforto superior, em cerca de, 3 °C.

Assim, aumentando a velocidade do ar pode efetuar-se uma correção dos limites superiores das temperaturas operativas de conforto, utilizando os valores indicados na figura 2.17.

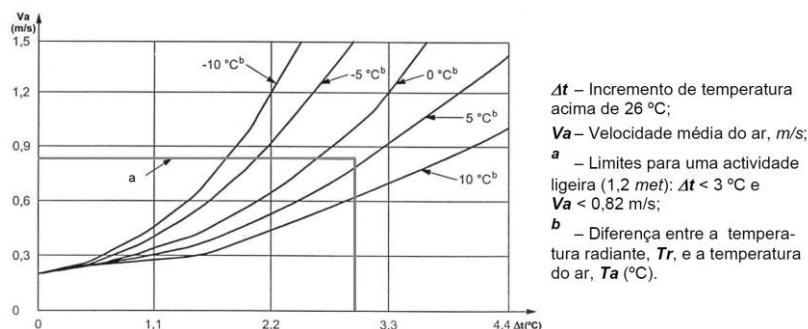


Fig.2.17. – Velocidades do ar que permitem atenuar o efeito de temperaturas elevadas, adaptado de [37]

A temperatura de referência considerada nas curvas representadas na figura 2.17 é de 26 °C e a velocidade média do ar de 0,20 m/s.

#### 2.2.3.4. Desconforto Local

Os parâmetros descritos anteriormente foram usados para descrever as condições térmicas relativas às trocas de calor de todo o corpo, no entanto, isto não é suficiente. Um indivíduo pode considerar que a temperatura ambiente está agradável, mas sentir-se desconfortável em consequência, quer de uma corrente de ar, quer de calor em excesso numa zona localizada do corpo. Situações deste tipo denominam-se de “desconforto local” e afetam essencialmente pessoas em atividade sedentária [37] [40] [72] [73]. Os fatores que provocam o desconforto local são:

- Assimetria de temperatura radiante;
- Correntes de ar;
- Temperatura do pavimento demasiado elevada ou baixa;
- Diferenças de temperatura do ar na vertical.

A assimetria de temperatura radiante (RTA - *Radiant Temperature Asymmetry*), define-se como a diferença entre a temperatura radiante em dois lados opostos de uma pessoa, também definida como “a diferença entre a temperatura radiante plana dos dois lados opostos de um pequeno elemento plano” [37].

Numa situação em que um indivíduo está sentado de costas para um envidraçado numa sala devidamente aquecida e sente frio/calor nas costas, verifica-se uma situação de desconforto localizado causado por uma assimetria de temperatura radiante. Os dados disponíveis referem-se somente a pessoas sentadas e estas são mais sensíveis a assimetrias radiantes provocadas por tetos e paredes frios ou quentes.

A assimetria da temperatura radiante pode ser determinada com base na medição da temperatura superficial de duas superfícies opostas e do respetivo fator de forma [67].

A temperatura radiante plana na direção da fachada, incluindo o efeito da incidência direta da radiação solar, é dada por [6] [62]:

$$Tp_{pr1} = \sum_{i=1}^N F_{d1 \rightarrow i} \cdot T_i + \frac{\tau_{fachada}}{\varepsilon_s \sigma} \left( \alpha_{irr,d} \sum_{j=1}^M F_{d1 \rightarrow v\tilde{a}o} I_{d,j} + \alpha_{irr,b} f_p I_b \right) \quad (2.13.)$$

em que:

$F_{d1 \rightarrow i}$	Fator de forma entre o pequeno elemento plano e as superfícies interiores na direção da fachada;
$T_i$	Temperatura da superfície $i$ ;
$\tau$	Transmitância da fachada com ou sem dispositivos de proteção;
$F_{d1 \rightarrow v\tilde{a}o}$	Fator de forma entre o pequeno elemento plano e o vão envidraçado;
$I$ e $\alpha$	Representam o efeito da radiação solar direta e difusa, respetivamente.

A temperatura radiante plana na direção oposta é dada por:

$$Tp_{pr2} = \sum_{i=1}^N F_{d1 \rightarrow i} \cdot T_i \quad (2.14.)$$

Assim, a assimetria da temperatura radiante é igual a:

$$\Delta T_{pr} = |T_{pr1} - T_{pr2}| \quad (2.15.)$$

Os fatores de forma entre um pequeno elemento plano e as superfícies circundantes, figuras 2.18 e 2.19, pode ser determinado a partir de:

- O fator de forma entre um pequeno elemento plano e superfícies paralelas:

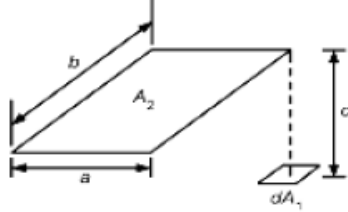


Fig.2.18. – Pequeno elemento plano e superfícies paralelas

$$x = a/c$$

$$y = b/c$$

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) \quad (2.16.)$$

- O fator de forma entre um pequeno elemento plano e superfícies perpendicular:

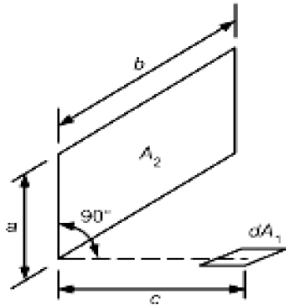


Fig.2.19. – Pequeno elemento plano e superfícies perpendiculares

$$x = a/b$$

$$y = c/b$$

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \frac{1}{y} - \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (2.17.)$$

$$\text{Ou } F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \frac{1}{x} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{x}\right)^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (2.18.)$$

Uma corrente de ar é sentida por um indivíduo quando parte do corpo está exposto a uma velocidade excessivamente elevada do ar causando um arrefecimento do corpo (perdas por convecção). A corrente de ar é uma das maiores fontes de queixas e pode ser quantificada através de um parâmetro denominado “risco de corrente de ar”, *DR* (*Draught risk*) em %, que permite estimar a percentagem de pessoas que são incomodadas por uma corrente de ar [37] [40].

No caso particular de temperaturas elevadas (estação de arrefecimento;  $T_a > 26^\circ\text{C}$ ), a velocidade do ar pode ser benéfica (nomeadamente através do controlo pessoal da abertura de janelas ou ventiladores no teto), pois pode permitir temperaturas maiores que a temperatura de conforto.

Deve notar-se que o desconforto local pode ser mais crítico do que o desconforto global devido a um inadequado estado térmico global do corpo, uma vez que a insatisfação admissível é menor (como é o caso das diferenças de temperatura do ar na vertical ou da assimetria de radiação) [74].

#### 2.2.3.5. Norma EN ISO 7 730

Na norma EN ISO 7 730:2005 “*Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*” [40] são apresentados métodos que permitem estimar, para pessoas expostas a ambientes térmicos moderados:

- A sensação térmica global do corpo (os índices PMV e PPD expressam o desconforto quente ou frio para o corpo como um todo);
- O grau de desconforto local.

Segundo a Norma Europeia EN ISO 7 730:2005 [40], a utilização do índice PMV é recomendada unicamente para valores de PMV compreendidos entre -2 (fresco) e +2 (quente) e, ainda, que os seis parâmetros,  $M$ ,  $I_{cl}$ ,  $T_a$ ,  $T_{mr}$ ,  $v_a$  e  $p_a$  estejam nos intervalos indicados no quadro 2.4.

Quadro 2.4. - Intervalos de variação dos parâmetros intervenientes no cálculo de PMV [39]

Parâmetro	Intervalo de variação
$M$	0,8 a 4 met
$I_{cl}$	0 a 2 clo
$T_a$	10 a 30 °C
$T_{mr}$	10 a 40 °C
$v_a$	0 a 1 m/s
$p_a$	0 a 2,7 kPa

No quadro 2.5 são apresentadas as três classes (categorias) de ambientes térmicos definidas na norma, com diferentes níveis de exigências que diminuem da classe A para a classe C.

Quadro 2.5. – Ambientes térmicos e respetivas exigências [40]

Classe	Estado térmico global do corpo			Desconforto local		
	PPD [%]	PMV	DR [%]	$\Delta T_{a,v}$	PD [%] $t_f$	$\Delta T_{pr}$
A	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	<10	<3	<10	<5
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	<20	<5	<10	<5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	<30	<10	<15	<10

A classe A (elevada expectativa) é recomendada para espaços ocupados por pessoas debilitadas com necessidades especiais (jovens crianças (bebés), idosos e deficientes), a classe B deve ser utilizada para edifícios novos ou sujeitos a ações de reabilitação e a classe C pode ser usada em edifícios existentes [75].

Para cada ambiente térmico específico existe uma temperatura operativa (ideal) correspondente a  $PMV = 0$  (neutralidade térmica), dependente da atividade,  $M$ , e do vestuário dos ocupantes,  $I_{cl}$ . Na figura 2.20 representa-se a temperatura operativa ideal em função dos parâmetros individuais para um ambiente térmico de classe B.



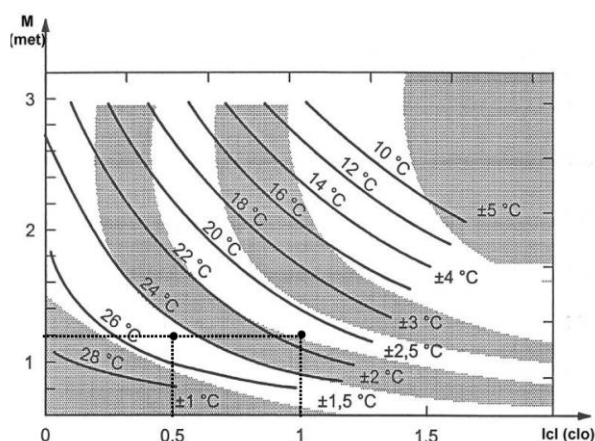


Fig.2.20. – Temperatura operativa ideal para um ambiente de classe B, adaptado de [39]

Para calcular os índices PMV e PPD, tendo em conta o balanço térmico, são considerados os parâmetros físicos do ambiente interior ( $T_a$ ,  $T_{mr}$ ,  $v_a$  e  $p_a$ ) obtidos de acordo com a norma EN ISO 7 726:2001 [45] e os parâmetros individuais ( $M$  e  $R_c$ ) obtidos de acordo com as normas EN ISO 8 996:2004 [76] e EN ISO 9 920:2007 [77].

Na norma verifica-se a introdução do conceito de adaptação (parâmetros subjetivos). Além do vestuário os ocupantes podem alterar a postura corporal ou reduzir/aumentar a sua atividade, permitindo assim, ampliar as gamas de temperatura aceitáveis [45].

O índice PMV é particularmente sensível aos valores de *met* e *clo*, estes podem ser encontrados em bibliografia especializada, nomeadamente em [37], [40]. A influência da humidade na sensação térmica é pequena para temperaturas moderadas, pelo que pode usualmente ser ignorada quando se calcula o valor de PMV [40].

Para além dos limites recomendados para os índices PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) na norma ISO 7 730:2005 [40], também são referidos limites para os fatores que provocam o desconforto térmico localizado para a atividade sedentária, a norma recomenda que, para garantir que mais de 90% dos ocupantes não sintam desconforto [75], nomeadamente:

a) Em condições de inverno:

i) Assimetria de temperatura radiante

As assimetrias de temperatura radiante de janelas ou outras superfícies frias verticais devem ser inferiores a 10 °C (em relação a um pequeno plano vertical colocado a 0,6 m acima do pavimento);

No caso de assimetrias de temperatura radiante de superfícies horizontais, o seu valor deverá ser inferior a 5 °C (em relação a um pequeno plano vertical colocado a 0,6 m acima do pavimento).

ii) Correntes de ar

A corrente de ar é uma das causas mais comuns de desconforto local. O valor limite recomendado para a velocidade média do ar deve ser inferior a 0,15 m/s.

iii) Diferenças de temperatura do ar na vertical

A diferença de temperatura do ar na vertical entre 0,10 m e 1,80 m acima do pavimento (níveis do tornozelo e da cabeça) deve ser inferior a 3 °C;

Em geral, a temperatura ao nível da cabeça é ligeiramente mais elevada. No entanto se for em demasia, regista-se uma situação de desconforto. As pessoas são mais sensíveis quando a temperatura aumenta no sentido ascendente.

#### iv) Temperatura do pavimento

A temperatura superficial do pavimento deverá estar compreendida entre 19 °C e 26 °C.

Se a temperatura do pavimento estiver demasiadamente elevada ou demasiadamente baixa, um indivíduo pode sentir-se desconfortável por ter os pés quentes ou frios demais. Para pessoas que usem calçado “leve” o tipo de material de revestimento é indiferente, no entanto, para pés descalços recomenda-se o uso de revestimentos têxteis ou de madeira.

#### b) Em condições de verão:

##### i) Correntes de ar

A corrente de ar é uma das causas mais comuns de desconforto local. O valor limite recomendado para a velocidade média do ar deve ser inferior a 0,25 m/s.

##### ii) Diferenças de temperatura do ar na vertical

A diferença de temperatura do ar na vertical entre 0,10 m e 1,80 m acima do pavimento (níveis do tornozelo e da cabeça) deve ser inferior a 3 °C.

#### 2.2.3.6. Norma ASHRAE - 55

A norma ASHRAE - 55:2010 *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers [37] especifica as condições de conforto térmico para as quais pelo menos 80% dos ocupantes com atividade sedentária ( $\pm 1,2$  met) considerem o ambiente termicamente aceitável. É uma norma orientada para o projeto de arquitetura de edifícios ou espaços e para os seus sistemas de climatização e para a avaliação de ambientes térmicos. A norma indica três métodos para especificar as condições de conforto térmico:

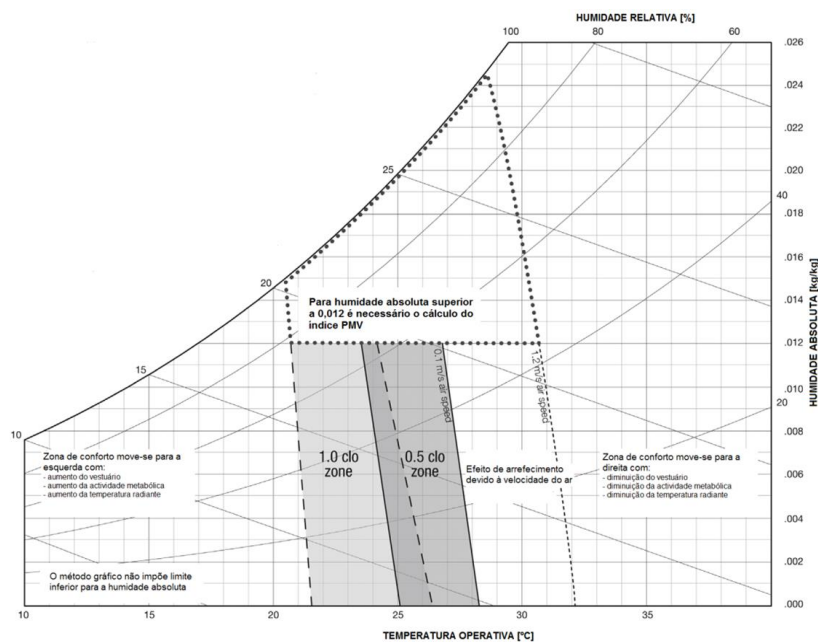


Fig.2.21. – Zona de conforto térmico (método gráfico simplificado), adaptado de [30] [37]

O primeiro, Método Gráfico Simplificado (considera a temperatura operativa e a humidade absoluta), aplicável a ambientes com velocidades do ar inferiores a 0,2 m/s, em que as atividades dos ocupantes são sobretudo sedentárias (1,0 a 1,3 met) e estes utilizam vestuário com resistência térmica compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, respetivamente, para a situação de verão e de inverno. As zonas de conforto foram definidas admitindo que 80% dos ocupantes estão satisfeitos com o ambiente térmico do espaço, este limite de 80%, corresponde às condições aceitáveis de conforto térmico definidas para os índices PMV (-0,5 a +0,5) e PPD (<10%). A norma indica valores máximos de 12 g/kg para a humidade absoluta, não sendo especificado qualquer mínimo, mas segundo a norma, ultrapassar o valor máximo não implica obrigatoriamente uma situação de desconforto térmico. Nessas situações propõe-se o cálculo exato dos índices térmicos PMV e PPD para avaliação mais precisa do conforto térmico do espaço em estudo, figura 2.21;

O segundo método, válido para espaços em que os ocupantes têm uma taxa de metabolismo entre 1,0 e 2,0 met, e um vestuário com  $I_{cl}$  até 1,5 clo, corresponde aos índices térmicos PMV e PPD descrito na norma Europeia EN ISO 7 730 [37];

E o terceiro método, alternativo para espaços condicionados naturalmente (sem sistemas de climatização) onde os seus ocupantes podem livremente adaptar o seu vestuário às condições ambientes interiores ou exteriores, baseia-se no modelo adaptativo desenvolvido por De Dear *et al* [47] e já apresentado atrás sob a forma gráfica na Fig. 2.14.

O modelo é válido para as seguintes condições [37]:

- Espaços naturalmente condicionados onde as condições térmicas do espaço são, principalmente, reguladas pelos seus ocupantes através da abertura ou fecho dos vãos envidraçados (de fácil acesso);
- Os espaços podem dispor de sistema de aquecimento, no entanto, este método não pode ser aplicado quando o sistema estiver em funcionamento;
- Não podem ter qualquer sistema mecânico de refrigeração (podem existir sistemas mecânicos de ventilação, por exemplo uma ventoinha);
- Os ocupantes dos espaços devem ter atividades entre 1,0 e 1,3 met e devem ser livres de adaptar o seu vestuário em função das condições ambientes (interior e exterior);
- Temperaturas médias mensais exteriores entre os 10 e os 33,5 °C.

#### 2.2.3.7. Norma EN 15 251

A norma EN 15 251:2007 *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustic* [46] especifica os critérios de conceção a utilizar no dimensionamento dos sistemas de climatização, assim como os parâmetros físicos mais influentes a considerar nos métodos de cálculo do desempenho energético dos edifícios e na avaliação do ambiente interior.

Em termos de conforto térmico, para edifícios climatizados, a norma especifica as gamas de temperatura, ou os limites aceitáveis dos índices térmicos PMV e PPD, com base nos mesmos critérios adotados na norma EN ISO 7 730 [37].

Os ambientes térmicos também são classificados por classes em função do grau de exigência pretendido para o edifício em análise e para os seus ocupantes, figura 2.15.

Também nesta norma as atividades dos ocupantes são sobretudo sedentárias (1,0 a 1,3 met) e estes utilizam vestuário com resistência térmica compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, respetivamente, para a situação de verão e de inverno. As categorias de conforto foram definidas de acordo com os índices PMV e PPD recomendados para edifícios com climatizados.

Relativamente aos edifícios com utentes idosos, a norma remete para o documento de especificações técnicas (ISO/TS 14 415) [78] os aspetos importantes a ter em atenção, e recomenda ambientes de classe I para esse tipo de espaços interiores.

#### 2.2.3.8. Modelo Proposto pelo LNEC

Após um estudo experimental realizado por Luís Matias [4], que incluiu a medição “in situ” dos parâmetros de conforto térmico e a realização de inquéritos aos ocupantes para posterior comparação, que englobou 290 levantamentos (estudos de campo) das condições térmicas em diversos edifícios de escritórios, de ensino superior, de habitações convencionais e lares de idosos, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) propõe um novo modelo de conforto adaptativo a aplicar a edifícios em Portugal. Esse estudo permitiu definir duas temperaturas operativas de conforto,  $T_{oc}$ , uma a ser aplicada em ambientes climatizados e outra a ser aplicada em ambientes não climatizados, em função da temperatura exterior média exponencialmente ponderada dos últimos 7 dias,  $T_{mp}$ , equações 2.19 e 2.20. A  $T_{oc}$  foi designado pelo autor por  $T_{conf}$ .

$$\text{Sistema de climatização ativo: } T_{oc} = 0,30.T_{mp} + 17,9 \quad (2.19.)$$

$$\text{Sistema de climatização inativo: } T_{oc} = 0,43.T_{mp} + 15,6 \quad (2.20.)$$

em que:

$T_{oc} - T_{conf}$  Temperatura operativa de conforto (°C);

$T_{mp}$  Temperatura exterior média exponencialmente ponderada dos últimos 7 dias (°C).

O desfasamento em relação ao valor de temperatura de conforto, das temperaturas que limitam as gamas de conforto, considerado neste modelo foi de  $\pm 3$  °C [4]. Este desfasamento garante uma zona de conforto para uma aceitabilidade térmica de 90%, figura 2.22.

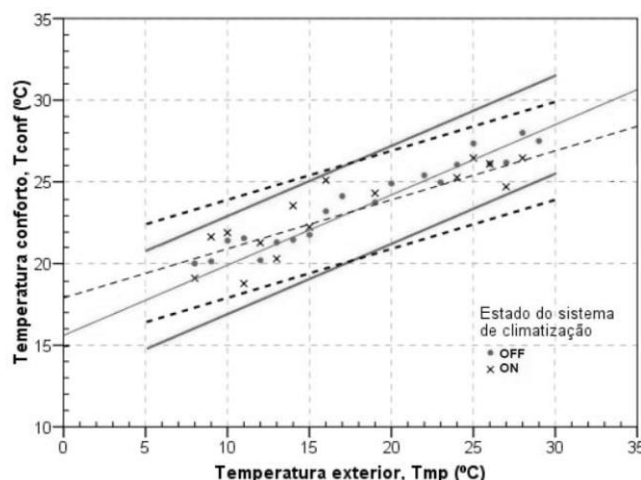


Fig.2.22. - Modelo de conforto térmico adaptativo LNEC, adaptado de [4]

### 2.2.3.9. Legislação Nacional

Em Portugal, em meados dos anos 1980, as Regras de Qualidade Térmica para Edifícios admitia que os padrões de conforto poderiam ser traduzidos pela fixação de valores limites para [17]:

- A temperatura do ar interior, que pode variar entre 18 °C e 26 °C, tendo em conta a variação sazonal da temperatura exterior podendo estes limites ser excedidos em 2 °C, em períodos curtos. A flutuação diária da temperatura durante os períodos de ocupação não deve ser superior a  $\pm 2$  °C e, em períodos de inverno, a diferença de temperatura para locais não aquecidos (corredores, vestíbulos, etc.), ou para locais onde o nível de atividade seja elevado (oficinas, ginásios, etc.) não deve ser superior a 4 °C;
- A humidade relativa do ar, que deve estar compreendida entre 35% e 85%, mas devendo evitar-se que em períodos de verão exceda os 60%;
- A radiação do contorno, a temperatura média de radiação deve apresentar valores próximos da temperatura do ar;
- A velocidade do ar, de inverno deve ser inferior a 0,2 m/s, de verão a velocidade pode ser mais elevada nos locais de atividade mais pesada (oficinas, ginásios, etc.), mas não devendo ultrapassar os 0,5 m/s.

O primeiro instrumento legal que impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico no interior dos edifícios sem necessidades excessivas de energia, em Portugal, foi o *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (RCCTE), em 1990 [79].

Em 1992 e 1998, surgiram o RQSECE (*Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios*) e o RSECE (*Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios*), nos quais foram estabelecidas exigências de conceção e instalação de sistemas, tendo em vista a sua racionalização energética [80] [81].

Posteriormente, em 2006, no âmbito da transposição da diretiva europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), Diretiva 2002/91/CE, [14], o RCCTE [82] e o RSECE [83] foram atualizados e foi criado o SCE (*Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios*) [84] para dinamizar a Certificação Energética de Edifícios com mecanismos de controlo adequados, e a qualificação e responsabilização dos técnicos intervenientes.

Esta versão do RCCTE veio estabelecer requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos serviços sem sistemas de climatização, ao nível das características da envolvente (paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas) e impõe limites às necessidades energéticas para climatização e produção de águas quentes. Determina também a obrigatoriedade da instalação de coletores solares e valoriza a utilização de outras fontes de energia renovável na determinação do desempenho energético do edifício.

Neste contexto para o cálculo das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, os regulamentos energéticos, RCCTE [82] e RSECE [83], numa aproximação estática e defensiva, por simplificação definiam valores fixos de condições ambientes de conforto. Segundo o RCCTE, “as condições ambientes de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento, e uma temperatura do ar de 25 °C e 50% de humidade relativa, para a estação de arrefecimento; a taxa de referência para a renovação do ar, para garantia da qualidade do ar interior, é de 0,6 renovações por hora, devendo as soluções construtivas adotadas para o edifício ou

*fração autónoma, dotados ou não de sistemas mecânicos de ventilação, garantir a satisfação desse valor sob condições médias de funcionamento” [81].*

O RSECE [83] veio igualmente definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços (com área útil superiores a 1000 m<sup>2</sup>) e de habitação dotados de sistemas de climatização de potência superior a 25 kW, os quais, para além dos aspetos da qualidade da envolvente e da limitação dos consumos energéticos (velocidade do ar interior não deve exceder os 0,2 m/s e os desequilíbrios radiativos devem ser compensados), abrangem também a eficiência e manutenção dos sistemas de climatização dos edifícios. Neste regulamento, a qualidade do ar interior surge também com requisitos que abrangem as taxas de renovação do ar interior nos espaços e a concentração máxima dos principais poluentes.

Recentemente, em 2013, no âmbito da transposição da diretiva europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), Diretiva 2010/31/CE, [7], o RCCTE [82], o RSECE [83] e o SCE [84] foram atualizados. Criando-se o SCE (*Sistema de Certificação Energética dos Edifícios*), o REH (*Regulamento dos Edifícios de Habitação*) e o RECS (*Regulamento Energéticos dos Edifícios de Comércio e Serviços*) [8], aglutinados num único diploma, com vista a promover a harmonização concetual e terminológica e a facilidade de interpretação por parte dos técnicos intervenientes, mas com separação clara do âmbito de aplicação do REH e RECS. Além da atualização dos requisitos de qualidade térmica, foram introduzidos requisitos de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios.

Para o cálculo nas necessidades de aquecimento e de arrefecimento, atualmente, os regulamentos energéticos (REH e RECS [8]). Segundo o REH [8], “as condições ambientes de conforto de referência são uma temperatura do ar de 18 °C para a estação de aquecimento, e uma temperatura do ar de 25 °C e 50% de humidade relativa, para a estação de arrefecimento; a taxa de referência para a renovação do ar, para garantia da qualidade do ar interior, é de 0,4 renovações por hora” [8].

Refira-se o fato do regulamento assentar no pressuposto de que existem sistemas de climatização implementados, limitando os seus potenciais consumos para os períodos de aquecimento e de arrefecimento. Salienta-se ainda que as condições de referência para o cálculo dos índices  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ , pressupõem a manutenção dos valores da temperatura de referência (18 °C e 25 °C), ao longo de 24 horas por dia. Salienta-se desde já, o facto de estas condições não corresponderem de todo as condições reais observadas em edifícios em Portugal [4].

Complementando os dois regulamentos energéticos (REH e RECS [8]) a certificação energética incide na verificação da conformidade regulamentar da fração, culminando o processo com a emissão de um Certificado Energético e da Qualidade do Ar Interior no qual é atribuído uma determinada classe energética numa escala que varia de A+ (mais eficiente) a F (menos eficiente), em função do desempenho energético determinado.

Em termos de legislação portuguesa existe ainda outro documento importante que indica valores para a temperatura e a humidade do ar em ambientes de trabalho (RGHST de 1986) [85]. O referido Decreto-Lei (com mais de 25 anos) que aprova o Regulamento Geral de Higiene e Segurança do Trabalho nos estabelecimentos Comerciais, de Escritórios e Serviços refere que “a) A temperatura dos locais de trabalho deve, na medida do possível, oscilar entre 18 °C e 22 °C, salvo em determinadas condições climatéricas, em que poderá atingir os 25 °C. b) A humidade da atmosfera de trabalho deve oscilar entre 50% e 70%”. No dito documento também é referido que “c) Sempre que da ventilação natural não resulte uma atmosfera de trabalho conforme as alíneas anteriores, deve-se procurar adotar sistemas artificiais de ventilação e de aquecimento ou arrefecimento, conforme os casos” [85].

## 2.3. CARATERIZAÇÃO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

### 2.3.1. INTRODUÇÃO

Os vãos envidraçados são frequentemente considerados como o elo-fraco da envolvente dos edifícios, através dos quais se transmitem de modo mais acentuado os parâmetros que caracterizam o clima exterior como a luz, a temperatura, a radiação solar, o vento e o ruído. Sendo assim, o projeto dos vãos envidraçados constitui um dos fatores críticos para a obtenção de condições ambientais adequadas no interior dos edifícios.

O vão envidraçado é um elemento muito importante na envolvente dos edifícios, pois permite o contato com o ambiente circundante e trocas de energia entre os ambientes exterior e interior. Normalmente é constituído por uma caixilharia (partes móveis e fixas) de madeira, de alumínio, de ferro ou de PVC, suportando uma chapa de vidro, acrílico ou de policarbonato (elemento translúcido ou transparente), fixa à parede e pode ser complementado por dispositivos de proteção solar e de oclusão noturna. O desempenho de um vão envidraçado é determinado pelo desempenho de cada um dos seus componentes que, nos últimos anos, têm sido alvo de muitos estudos inovadores e de melhoria. Não descurar que uma instalação adequada também é um aspeto importante no seu desempenho.

A avaliação do desempenho dos vãos envidraçados deverá ter em conta todos os componentes que os constituem, a figura 2.23 ilustra as diferentes funções de um vão envidraçado [86].

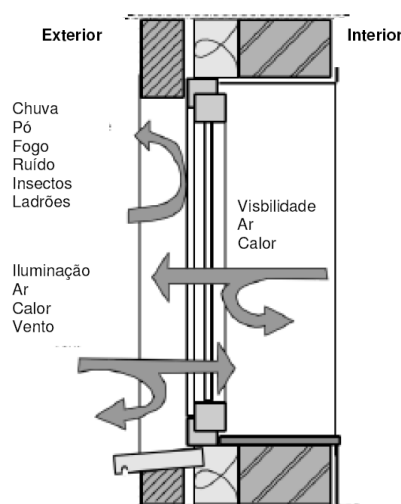


Fig.2.23. – Diferentes funções do vão envidraçado, adaptado de [87]

Em termos gerais, a contribuição positiva dos vãos envidraçados são os ganhos solares no inverno, o contato com o exterior, a iluminação, a visão do exterior, a ventilação e a estanquidade. Mas os vãos envidraçados também têm alguns inconvenientes, nomeadamente, podem dar origem a sobreaquecimento, a perdas térmicas no inverno, ao encandeamento, a correntes de ar, a assimetria radiante, a falta de segurança e a perda de privacidade.

A transmissão de calor através dos vãos envidraçados está associada à diferença de temperatura entre o ambiente exterior e o interior, à radiação solar que nele incide e às propriedades do vidro:

- O fator solar do vidro ( $g_{\perp,vi}$ ) permite quantificar os ganhos solares de um determinado tipo de vidro e define-se como sendo o quociente entre a energia solar total transmitida e a energia solar incidente. Tipicamente, o  $g_{\perp,vi}$  dos vidros varia de 0,35 a 0,88, em que os menores valores

indicam menores ganhos solares. O  $g_{\perp,vi}$  constitui uma medida da fração da energia solar que efetivamente penetra para o interior dos compartimentos [8];

- O Fator solar de um vão envidraçado ( $g_T$ ) permite quantificar os ganhos solares de um determinado vão envidraçado e define-se como sendo o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respetivo dispositivo de proteção 100% ativo e a energia da radiação solar que nele incide [8];
- O coeficiente de transmissão térmica,  $U_w$ , e o coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite  $U_{wdn}$ , sendo a transmissão de calor tanto maior quanto maior for o valor de  $U_w$  ou  $U_{wdn}$ . [19].

### 2.3.2. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO VÃO ENVIDRAÇADO

O calor perdido através dos vãos envidraçados dá origem a uma porção significativa das necessidades de energia para aquecimento dos edifícios. Consideráveis avanços têm sido feitos em tecnologias para os vãos envidraçados nos últimos tempos e o potencial de poupança energética dos vãos envidraçados ainda é muito grande. “Estudos realizados em 2003 nos 15 países, que nessa data, faziam parte da União Europeia mostraram que havia 1 303 milhões vãos envidraçados com vidro simples e 1 300 milhões com vidros duplos. Com a implementação de um certificado energético para os vãos envidraçados a EWERS (*European Window Energy Rating System*) estimou que daria um potencial de poupança de energia (com a tecnologia existente na altura) de 300-500 TWh por ano só nos edifícios residenciais. Atualmente, existe obviamente um potencial muito maior com o aumento do tamanho do mercado europeu com os novos países membros da UE. Usando os mesmos valores, isso pode fornecer uma redução potencial de emissões de CO<sub>2</sub> de 80-133 milhões de toneladas por ano [88] [89].

Um vão envidraçado pode influenciar o conforto térmico de três maneiras:

- Radiação de grande comprimento de onda da superfície interior do vidro;
- Transmissão da radiação solar e do calor por condução;
- Movimento do ar (movimentos convectivos) causado por uma diferença entre a temperatura da superfície do vidro e temperatura do ar adjacente.

Pode-se considerar três tipos de fluxo de energia através dos vãos envidraçados como sendo principais:

- Perdas e ganhos de calor (não solar) na forma de condução, convecção e radiação;
- Ganho de calor solar na forma de radiação;
- Trocas de ar (ventilação e infiltração).

O conhecimento da interdependência da ação térmica com os parâmetros ambientais, tais como, temperatura do ar, ação do vento e radiação solar, permitirá estabelecer relações entre eles e o elemento da envolvente com vista à melhoria sucessiva do seu desempenho térmico.

Na transferência de calor que ocorre através do elemento da envolvente, entre o ambiente interior e o ambiente exterior, distinguem-se vários mecanismos de transferência e regiões onde estas se realizam, ou seja:

- Elemento construtivo, onde se transmite o calor por condução entre ambas as faces;



- Superfícies, em contato com o ambiente, onde se processam a troca de calor por convecção entre estas e o ambiente e a troca de calor por radiação entre estas.

Quando há uma diferença de temperatura, o calor flui do corpo a temperatura mais alta para o corpo a temperatura mais baixa, ou seja um gradiente de temperatura origina um fluxo de calor,  $q$  [90].

### 2.3.3. COMPONENTES DO VÃO ENVIDRAÇADO

#### 2.3.3.1. Elemento Translúcido ou Transparente

O elemento translúcido ou transparente é o componente com maior expressão no vão envidraçado, em termos de área, e aquele que estabelece as principais funções do mesmo. Existem no mercado muitas soluções para os elementos translúcidos ou transparentes dos vãos envidraçados, o seu desempenho depende das propriedades dos materiais e do número de camadas que os constituem, sendo os mais utilizados, o vidro, os acrílicos e as placas de policarbonato.

O vidro distingue-se de outros materiais por várias características: pela sua seletividade à radiação solar, deixando passar a radiação em forma de luz visível e sendo opaco à radiação térmica infravermelha, não é poroso nem absorvente, é dielétrico, possui baixo índice de dilatação e é resistente à compressão. A condutibilidade térmica é de  $1,00 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , o que, relativamente à sua densidade de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , é um valor baixo.

Tradicionalmente, os vãos envidraçados são feitos com vidro transparente. A maioria do vidro incolor utilizado nos edifícios de habitação é produzido por um processo designado por “float”, em que o vidro líquido é lançado sobre estanho fundido, sendo este menos denso que o estanho “flutua” [91]. O que determina as propriedades de cada vidro é o tratamento a que este é sujeito após a fusão, e assim sendo, podemos obter vidro temperado, laminado, de autolimpeza e térmico.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos vários tipos de vidros especiais com base em técnicas de mudança dos constituintes (coloridos, fototrópicos, termotrópicos, cromogénicos) ou da estrutura na face do vidro (capeamento metálico, multicamada ou capa de baixa emissividade – *low e*), levando a uma melhoria da refletância do vidro de modo a diminuir o sobreaquecimento no interior do espaço. Vidros com capas são normalmente incorporados em vidros múltiplos, em parte porque muitas camadas são leves e também por causa da necessidade de obter valores de transmissão térmica mais baixos. A resistência térmica também pode ser aumentada com a utilização de gases nobres entre os panos de vidro (árgon, cripton), ou usando isolamentos noturnos [92]. Para evitar condensações na lâmina de ar, este deverá estar cheia de ar desidratado e ser estanque de forma permanente.



Fig.2.24. – Janela de PVC com vidro triplo [93]

Mas também já se faz a aplicação de vidro triplo, principalmente nos países onde o clima é mais frio. O vidro triplo é composto, como o nome indica, por três chapas de vidro e por duas lâminas de ar ou de um gás inerte, que conferem um excelente desempenho térmico, por exemplo, o coeficiente de

transmissão térmica para um vidro triplo com as lâminas de ar preenchidas com um gás inerte, cripton, é de  $0,60 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  [93]. O vidro triplo tem com vantagem o facto de proporcionar um excelente isolamento térmico, mas tem alguns inconvenientes, nomeadamente, o seu peso, a sua transmissão luminosa é fraca, capta pouca radiação solar (tem um fator solar baixo), o isolamento acústico é inferior relativamente ao vidro duplo e o custo de aquisição é elevado [93], figura 2.24.

No quadro 2.6 estão resumidas as principais propriedades do vidro corrente.

Quadro 2.6. – Principais propriedades do vidro [91]

Propriedades	Valor característico
Densidade, $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	2500
Calor específico [ $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ]	750
Dureza	6,5 na escala de Mohs
Condutibilidade térmica, $\lambda$ [ $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ]	1,0
Isolamentos acústicos aos sons aéreos, $R_w$ [dB]	31 para vidros simples com 6 mm
Índice de refração	1,52 significa que a velocidade da luz no vidro é cerca de 2/3 da velocidade da luz na vácuo.
Fator de refração, $\rho$	mede a proporção de energia incidente que é reflectida pela superfície
Fator de absorção, $\alpha$	mede a proporção de energia incidente que é absorvida pela superfície
Fator de transmissão, $\tau$	mede a proporção de energia incidente que é transmitida pela superfície
Emissividade, $\varepsilon$	0,89, capacidade do material em emitir calor por radiação, quanto mais reflectivo for o material menor será a sua emissividade
Resistência à compressão [MPa]	1000
Resistência à flexão [MPa]	40 para um vidro recozido e 120 a 200 para um vidro temperado
Módulo de Young, $E$ [GPa]	70
Coeficiente de Poisson, $\nu$	0,22
Coeficiente de dilatação linear, $\alpha$ [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ]	$9 \times 10^{-6}$

Nos últimos anos também têm sido desenvolvidos outros tipos de elementos translúcidos ou transparentes que podem substituir ou ser associados ao vidro, constituindo soluções interessantes do ponto de vista da eficiência energética, permitindo uma grande transmissibilidade e consequentemente ganhos térmicos diretos, com uma boa capacidade de isolamento térmico e assim a manutenção do calor no interior dos edifícios durante a noite, mesmo sem utilizar sistemas de oclusão noturnos, são normalmente chamados de materiais de isolamentos transparentes ou translúcidos (TIMs - *Transparent ou Translucent Insulating Material*) [92] [102]. Estes materiais conseguem uma transmissão da radiação solar superior a 50% e uma condutibilidade térmica inferior a  $0,2 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  [93].

Os materiais de isolamento transparente ou translúcido podem ser classificados em quatro tipos de acordo com a estrutura geométrica dos seus materiais, nomeadamente:

- Estrutura absorvente-paralela: consiste em camadas de vidro ou plástico colocadas paralelamente aos panos duplos onde se inserem e nalguns casos com revestimento com reflexão aos infravermelhos interiores;
- Estrutura absorvente-perpendicular: consiste em tubos de plástico ou vidro colocados transversalmente aos panos duplos onde se inserem;
- Estrutura em cavidades: é uma combinação entre as estruturas paralelas e as perpendiculares;
- Quase-homogéneos: caracterizados por uma grande absorção, proporcionam um desempenho térmico elevado (Aerogel de sílica e fibras de vidro podem ser considerados neste grupo).

Estes elementos transparentes não apresentam uma transparência equivalente à do vidro, a sua utilização não se faz normalmente em substituição deste, mas antes em casos específicos, tais como clarabóias, ou em substituição de vidro fosco ou tijolo de vidro [93].

No quadro 2.7 apresentam-se as propriedades térmicas, lumínicas e acústicas de vários tipos de vidro.

Quadro 2.7. – Propriedades térmicas, lumínicas e acústicas de vários tipos de vidro [92]

Tipo de envidraçado	Espessura	Transmissão lumínica	$U$	Fator Solar	$R_w$
	[mm]	[%]	[W/m <sup>2</sup> .°C]	[%]	[dB]
Vidro simples incolor	2-19	91-82	5,9-5,3	0,99-0,69	29-37
Vidro simples pirolítico	6	67-24	5,7	0,67	-
Vidro simples laminado acústico	6-10	89-87	5,7	0,79-0,75	36-37
Vidro duplo incolor	4-6-4	80	3,3	0,74	34
	4-12-4	80	2,9	0,75	33
Vidro duplo com baixa emissividade com ar na caixa-de-ar	6-16-4	75	1,4	0,57	34
Vidro duplo com baixa emissividade com árgon na caixa-de-ar	6-16-4	75	1,1	0,57	34
Vidro duplo com película de isolamento acústico no vidro interior	6-12-11	79	2,8	0,71	37
Vidro duplo com película de isolamento acústico em ambos os vidros	6-9-11	77	3,0	0,67	41

### 2.3.3.2. Caixilharia

Existem muitas soluções para os elementos de suporte dos vãos envidraçados, o desempenho de cada tipo de caixilharia depende das propriedades dos materiais que a constituem, sendo os materiais mais utilizados, a madeira, o alumínio e o PVC.

A madeira é um fraco condutor de calor, a caixilharia fabricada neste material apresenta uma condutibilidade térmica que varia em função do tipo de madeira entre 0,06 e 0,29 W/m.°C, obtendo-se coeficientes de transmissão térmica baixos, sendo considerado em termos de isolamento térmico uma boa solução. Sendo a madeira um material natural, esta é sensível à ação do clima e de agentes biológicos, necessitando por isso de manutenção cuidada. Sendo por essa razão aliada ao custo de inicial de aquisição que tem vindo a perder o seu espaço para outras soluções de caixilharia fabricadas noutros materiais, nomeadamente, para o alumínio e para o PVC.

O alumínio como material de fabrico de caixilharias é relativamente recente e tem perdido o seu espaço para o PVC, fundamentalmente pelo facto de as soluções de PVC apresentarem custo inferior e melhor desempenho térmico. A caixilharia de alumínio apresenta um coeficiente de transmissão térmica significativo, cerca de  $7 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , por esse facto o risco de condensações e de aparecimento de fungos no inverno é elevado, para compensar o fraco desempenho térmico foi criada a caixilharia com corte térmico, que pode reduzir para metade o coeficiente de transmissão térmica. O alumínio é um material leve e com boa resistência mecânica, uma permeabilidade ao ar limitada e dispensa a manutenção cuidada de que a madeira necessita.

O PVC como material de fabrico de caixilharia é muito recente. O PVC é um material termoplástico que resulta da combinação química de carbono, hidrogénio e cloro, apresentando um conjunto interessante de propriedades, pois é um material resistente, inerte, inócuo, impermeável, isolante e reciclável. Mas, o PVC tem o inconveniente ambiental de ser um produto com componentes derivados do petróleo como qualquer outro material plástico. Atendendo a estas características do PVC, a caixilharia obtida a partir deste material manifesta um desempenho excecional em termos de resistência mecânica, estanquidade à água, permeabilidade ao ar e de isolamento térmico e acústico. Embora o desempenho em termos de resistência mecânica seja positivo, conseguida com o reforço dos perfis de PVC com elementos metálicos, é ainda assim inferior comparando com o desempenho das outras soluções em madeira ou alumínio, pelo que, os perfis em PVC apresentem dimensões superiores [92].

A utilização do aço em caixilharia é muito reduzida. À semelhança da caixilharia em alumínio apresenta um coeficiente de transmissão térmica significativo, mas com boa resistência mecânica que permite executar vãos de grandes dimensões, mas com densidade superior, o que torna as caixilharias de aço mais pesadas e de difícil manobra. A permeabilidade ao ar da caixilharia de aço é também significativa, o que tem vindo a ser melhorado nos últimos anos, com as alterações praticadas nos perfis, permitindo a colocação de vedantes.

A caixilharia também pode ser constituída por dois ou mais dos materiais anteriormente apresentados, designados por caixilhos híbridos. No quadro 2.8 apresenta-se um resumo das propriedades dos materiais mais utilizados no fabrico de caixilharia.

Quadro 2.8. – Propriedades mais importantes dos materiais mais utilizados em caixilharia [87]

Propriedades	Madeira	Alumínio	PVC
Módulo de Young, $E$ [GPa]	10	70	2
Densidade, $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	200 a 870 (variável com o tipo de madeira)	2700 (cerca de 1/3 do aço)	1390
Condutibilidade térmica, $\lambda$ [ $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ]	Fraco condutor de calor. 0,06 a 0,29 (variável)	Bom condutor de calor. 230	Fraco condutor de calor. 0,17
Condutibilidade elétrica	Fraco condutor elétrico.	Excelente condutor elétrico.	Fraco condutor elétrico.
Coefficiente de dilatação térmica linear, $\alpha$ [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ]	$4 \times 10^{-6}$ (variável)	$23 \times 10^{-6}$	$70 \times 10^{-6}$
Combustibilidade	Combustível. Emite gases tóxicos quando arde.	Não combustível.	Combustível. Emite gases tóxicos quando arde.

### 2.3.3.3. Elementos Fixos do Vão Envidraçado

O revestimento do contorno dos vãos envidraçados com pedra ou com elementos pré-fabricados de betão é uma prática construtiva corrente, sendo usual a colocação do peitoril ou soleira na face inferior do vão. As restantes faces do vão envidraçado também podem ser revestidas, designando-se as peças de revestimento do contorno superior e lateral do vão envidraçado, respetivamente, por padieira e ombreiras.

No quadro 2.9 apresenta-se um resumo das propriedades dos elementos fixos do vão envidraçado mais utilizados.

Quadro 2.9. – Elementos fixos do vão envidraçado: Propriedades dos materiais mais utilizados [87]

Propriedades	Madeira	Granito	Mármore	Betão
Módulo de Young, $E$ [GPa]	10	40 a 70	50 a 100	14 a 41
Densidade, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	200 a 870	2500 a 2700	2600 - 2900	2300 - 2600
Condutibilidade térmica, $\lambda$ [W/m.°C]	0,06 a 0,29	2,80	3,50	2,00
Coefficiente de dilatação térmica linear, $\alpha$ [°C <sup>-1</sup> ]	$4 \times 10^{-6}$	$7 \text{ a } 14 \times 10^{-6}$	$7 \text{ a } 12 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
Combustibilidade	Combustível.	Não combustível.	Não combustível.	Não combustível.

Como se pode observar a pedra e o betão apresentam condutibilidades térmicas consideráveis, sendo nesse caso o contorno do vão envidraçado responsável por perdas de calor significativas.

### 2.3.3.4. Dispositivos de Oclusão Noturna e de Proteção Solar

No mercado existem muitos tipos diferentes de dispositivos de oclusão noturna e de proteção solar dos vãos envidraçados.

Estes dispositivos devem ser o mais flexíveis possível de modo a serem adaptados às variações climáticas diárias e anuais. Assim, no inverno, o dispositivo deverá permitir a entrada da radiação solar, e no verão, o mesmo deverá constituir uma barreira aos ganhos solares. Além de garantirem a proteção solar e a regulação da luminosidade durante o dia, à noite também podem contribuir para a redução das perdas térmicas (o desempenho depende do tipo de permeabilidade ao ar do dispositivo).

Estas proteções podem ser classificadas como exteriores, interiores ou intermédias em função da sua localização em relação ao envidraçado, sendo as primeiras consideradas mais eficientes, dado que refletem a radiação solar antes de entrar no espaço interior e dissipam para o exterior a energia absorvida, ver figura 2.25.

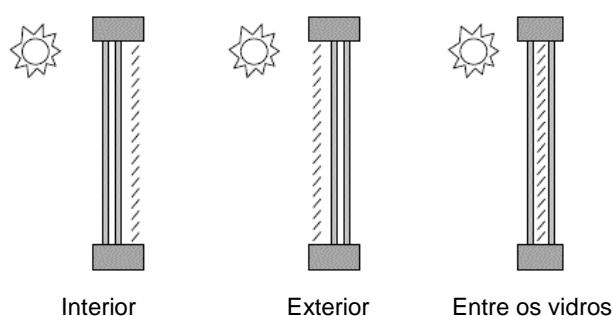


Fig.2.25. – Localização das proteções em relação ao envidraçado, adaptado de [37]

As portadas e as persianas podem ser colocadas tanto no exterior como no interior e proporcionam, para além do conforto térmico, obscurecimento, privacidade e segurança contra a intrusão. O controlo solar regulação da luminosidade são eficazes com este tipo de dispositivos, estes podem ser fabricados em diversos materiais: madeira, alumínio e PVC.

O quadro 2.10 apresenta um resumo das características relevantes dos materiais mais utilizados no fabrico dos dispositivos de oclusão noturna e proteção dos vãos envidraçados [93].

Quadro 2.10. – Características relevantes dos três materiais utilizados nos dispositivos de oclusão noturna e proteção solar dos vãos envidraçados [93]

		Madeira	PVC	Alumínio
Desempenho	Isolamento Térmico	O melhor	Excelente	Inferior ao PVC e à madeira
	Isolamento Acústico			
	Durabilidade	Muito bom, graças aos tratamentos fungicidas, inseticidas e hidrófugos	Muito resistente aos choques e à deformação. Muito boa resistência à chuva.	O melhor. Muito boa resistência à chuva. Estrutura sólida e resistente.
	Preço	Dispendioso	O mais económico	Entre o PVC e a madeira
	Estética	O mais nobre. Pode apresentar diversas cores, formas e detalhes	Menos nobre que a madeira e o alumínio. Vários modelos e cores	Acabamentos com cores e tratamentos diversos
	Manutenção	Pintura todos os 2-4 anos, dependendo da exposição	Nenhuma	Nenhuma. Resistente à corrosão quando bem tratado
	Proteção do Ambiente	Produto natural, reciclável	Reciclável	Reciclável

Existem também os designados por estores, que compreendem um alargado conjunto de modelos (estores de telas, de lâminas, de lamelas e as lamelas de sombreamento), podendo ser colocados no exterior, no interior ou entre os vidros.

Os estores de telas podem ser verticais ou projetáveis e podem ser fabricados em diversos tipos de materiais (algodão, acrílico, poliéster e polipropileno). A escolha do tipo de tela deverá ter em conta alguns aspetos (a proteção solar, a resistência ao vento e a impermeabilidade). O desempenho térmico dos estores de telas é inferior ao obtido com as portadas e persianas, mas o controlo solar é mais eficaz.

Os estores de lâminas são normalmente colocados no interior, mas também podem ser colocados no exterior, as lâminas são manobradas através de fios ou correntes, podem estar na vertical ou horizontal e são fabricados em madeira, alumínio ou PVC. O desempenho térmico dos estores de telas é inferior ao obtido com as portadas e persianas, mas em contrapartida, o controlo solar e a regulação da luminosidade são mais eficazes.

Os estores de lamelas são normalmente colocados no exterior e são constituídos por lamelas fixas ou orientáveis, podem estar na vertical ou na horizontal e são fabricados em madeira, alumínio ou PVC. O desempenho térmico dos estores de telas é inferior ao obtido com as portadas e persianas, mas em contrapartida, o controlo solar e a regulação da luminosidade são mais eficazes.

As lamelas de sombreamento são estruturas colocadas no exterior e são constituídos por lamelas em madeira, alumínio ou PVC. Este tipo de solução é instalado na fachada de edifícios e é adequado a edifícios com grandes superfícies envidraçadas. Em termos de controlo solar e da regulação da luminosidade são eficazes.

Também existem outras soluções que podem ser integradas ou não na arquitetura do edifício que proporcionam sombreamento dos vãos envidraçados, tais como palas (horizontais ou verticais) e vegetação de folha caduca.

#### 2.3.4. SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE VÃOS ENVIDRAÇADOS EXISTENTES OU EM DESENVOLVIMENTO

A classificação energética de envidraçados pode funcionar como motor da eficiência energética ao promover e reconhecer os produtos mais eficientes, distinguindo de forma inequívoca os melhores produtos, constituindo assim uma ferramenta importante que possibilitará aos projetistas e donos de obra a seleção de envidraçados energeticamente mais eficientes para aplicação em edifícios novos ou em edifícios existentes. Por outro lado, esta classificação poderá ser encarada ainda, como um dos caminhos necessários para garantir o cumprimento da Diretiva 2010/31/EU relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios [7].

Também é do conhecimento geral que os envidraçados contribuem de forma significativa para as perdas de energia nos edifícios e a melhoria do seu comportamento terá um impacto importante em termos energéticos e de conforto, pelo que esta classificação trará certamente grandes benefícios.

No âmbito do programa europeu SAVE II, foi constituído, em 2001, um grupo de trabalho composto por membros de oito países, com o objetivo de criar um sistema de classificação de envidraçados, a nível europeu, designado por EWERS “*European Window Energy Rating System*” [88], que adotou como princípio de classificação, a equação do balanço energético para a estação de aquecimento adaptado a cada zona climática existente na Europa. Este projeto foi desenvolvido entre abril de 2001 e março 2003 e sabe-se que foram implementados em data posterior, projetos-piloto, em 4 países membros do grupo de trabalho, encontrando-se, atualmente, em fase de avaliação nesses países [88]. O Reino Unido, Suécia, Finlândia e Dinamarca foram os países pioneiros de implementação do EWERS tendo sido criados respetivamente, os sistemas de classificação de janelas BFRC, STEM, MOTIVA e DEA.

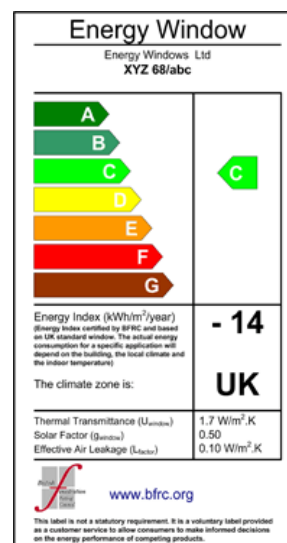


Fig.2.26. – Etiqueta do BFRC para classificação das janelas, adaptado de [97]

Salienta-se que nos regulamentos relativos à conservação de energia nos edifícios novos e existentes em vigor no Reino Unido foi proposto um método alternativo, para a verificação das exigências a cumprir pelos envidraçados, com base na classificação do BFRC (desenvolvido a partir EWERS). A etiqueta tipo do BFRC, conforme a figura 2.26, indica a classificação da janela, o balanço energético anual (por unidade de superfície) e os parâmetros característicos da mesma que determinaram aquela classificação e o balanço energético [97].

Existem noutros países sistemas de classificação de janelas, destacando-se o WERS na Austrália, o NFRC nos EUA e o CWDMA no Canadá. O sistema australiano associa a eficiência das janelas a uma escala de estrelas (1 a 10) e tem a particularidade de classificar separadamente o desempenho do envidraçado para as estações de aquecimento e de arrefecimento. O sistema canadiano determina o balanço energético para a estação de aquecimento e faz a classificação com base numa escala de 0 a 100.

No sistema americano, a classificação NFRC estabeleceu uma classificação nacional voluntária do desempenho energético e sistema de rotulagem para a janela, figura 2.27.

A Etiqueta tem as seguintes propriedades energéticas [98], [99]:

- O fator  $U$ , ou quanto uma janela mantém o calor dentro de um edifício;
- Ganho de calor solar, ou a capacidade de uma janela para bloquear o aquecimento causado pelo Sol;
- Transmitância da luz visível, ou quanta luz entra através de uma janela;
- Permeabilidade ao ar, perda de calor e ganho de ocorrer por infiltração através de fissuras da montagem da janela;
- Resistência à condensação, a capacidade de um produto para resistir à ocorrência de condensação na superfície interna da janela.

 <b>World's Best Window Co.</b> Millennium 2000+ Vinyl-Clad Wood Frame Double Glazing • Argon Fill • Low E Product Type: Vertical Slider	
ENERGY PERFORMANCE RATINGS	
U-Factor (U.S./I-P)	Solar Heat Gain Coefficient
<b>0.35</b>	<b>0.32</b>
ADDITIONAL PERFORMANCE RATINGS	
Visible Transmittance	Air Leakage (U.S./I-P)
<b>0.51</b>	<b>0.2</b>
Condensation Resistance	
<b>51</b>	—
<small>Manufacturers disclose that these ratings conform to applicable NFRC procedures for determining whole product performance. NFRC ratings are determined from a fixed set of environmental conditions and a specific product size. NFRC does not recommend any product and does not warrant the suitability of any product for any specific use. Consult manufacturer's literature for other product performance information.</small>	

Fig.2.27. – Etiqueta do NFRC para classificação das janelas, adaptado de [98]

É importante frisar que a classificação é relativa ao envidraçado completo (vidro + caixilharia), para que, tanto os fabricantes do vidro e como os fabricantes das caixilharias sentir-se-ão pressionados a melhorarem os seus produtos, com o intuito de conseguirem boas parcerias. Por outro lado, a divulgação junto do público-alvo tem de ser suficientemente clara, pois a caracterização em termos de coeficiente de transmissão térmica é relativa ao conjunto e não separadamente por componente, como usualmente é feita nos catálogos disponibilizados pelos fabricantes do vidro e das caixilharias, o que poderá induzir os compradores em erro, pois estes serão levados a pensar que o coeficiente de transmissão térmica do vidro ou da caixilharia é o mesmo para o envidraçado total.

Com a implementação deste sistema são esperados alguns benefícios, entre os quais se destaca [87]:

- Redução dos consumos e dos custos energéticos;
- Redução da emissão de dióxido de carbono;
- Redução do risco de formação de condensações;
- Melhoria das condições de conforto no interior dos edifícios;
- Constituição de um método para auxiliar a seleção de envidraçados.

Em junho de 2010 foi assinado um protocolo entre a *Glass For Europe*, a *European Aluminium Association - AISBL*, a *EuroWindow c/o UEAPME* e a *ES-SO European Solar Shading Organization vzw* para proporem um certificado energético para as janelas “*Window Energy Rating*” [100], figura 2.28.



			Energy	Door - Window
			Manufacturer	Name of Manufacturer
			System	System's Name
			Typology	Single Leaf Opening Window
			Transparent Size	1,00m (W) x 1,28m (H)
			Outdoor Visible Size	1,00m (W) x 1,28m (H)
			External Size	1,20m (W) x 1,48m (H)
			Product Operation	<input checked="" type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/> Automatic
			Shading	<input checked="" type="checkbox"/> Included <input type="checkbox"/> Excluded
Opening's Climate Condition	C1	D, Eltot El <sub>heat</sub> for Heating El <sub>cool</sub> for cooling	 More Efficient A B C D E F G Less Efficient	U <sub>w</sub> 2,00 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
	C2	C, Eltot El <sub>heat</sub> for Heating El <sub>cool</sub> for cooling		g <sub>gl</sub> 0,3
	C3	A, Eltot El <sub>heat</sub> for Heating El <sub>cool</sub> for cooling		L <sub>50Pa</sub> 0,2 $\frac{m^2/h}{m^2}$
				F <sub>s</sub> 25% <input type="checkbox"/> Internal <input type="checkbox"/> Middle <input checked="" type="checkbox"/> External
				LT 60% DP $\frac{32}{50}$
			■ Actual Energy Losses/Gains are Related on Product's Use ■ Further Information is Contained in Product Brochures ■ Product has been considered that will be placed on Residents	

Fig.2.28. – Etiqueta proposta pela industria da fenestração para classificação das janelas, adaptado de [100]

Em Portugal foi criada uma etiqueta energética para as janelas, figura 2.29, pela Agencia para a Energia (ADENE), no âmbito do Sistema de etiquetagem energética de produtos (SEEP) em colaboração com a Associação Nacional dos Fabricantes de Janelas Eficientes (ANFAJE), e com apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e do Instituto de Investigação de Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) [101].

Foi também criada a plataforma SEEP ([www.seep.pt](http://www.seep.pt)) com informação sobre o sistema de certificação de produtos.

A etiqueta energética das janelas permite aos projetistas e donos de obra comparar as soluções existentes no mercado apenas com a verificação da classe de desempenho energético, que vai de "G" (menos eficiente) a "A" (mais eficiente). Esta inclui também outra informação técnica mais detalhada, nomeadamente os parâmetros de cálculo que serviram para determinação do desempenho energético, para além de dados complementares relacionados com as características do vidro e a capacidade de atenuação acústica da janela. Para além da etiqueta comercial fornecida com a janela, esta incluída também uma pequena etiqueta, incorporada no caixilho que garantirá a rastreabilidade de cada janela em caso de necessidade de consultar a informação sobre a mesma posteriormente. A classe resulta da avaliação do desempenho da janela no mês mais frio e no mês mais quente do ano, traduzindo a melhor ou pior capacidade de reduzir as perdas térmicas no inverno ou minimizar o sobreaquecimento no verão. Tudo para o mesmo referencial normativo, o que permite uma comparação entre janelas, para as mesmas condições [101].



Fig.2.29. – Etiqueta energética da janela desenvolvida no âmbito do SEEP, adaptado de [101]

### 2.3.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS NO CONFORTO TÉRMICO

#### 2.3.5.1. Introdução

Nos pontos anteriores foram descritos os principais componentes dos vãos envidraçados e indicadas as normas de referência utilizadas para caracterizar o conforto térmico para o ambiente interior, neste ponto pretende-se evidenciar de que forma um determinado vão envidraçado vai influenciar o conforto térmico dos ocupantes de um determinado compartimento. Os fatores que determinam a influência dos vãos envidraçados nas condições de conforto térmico podem ser divididos em três categorias [102]:

i) Fatores de forma (*View factors*):

- Geometria da janela;
- Geometria do compartimento;
- Localização do ocupante.

ii) Temperatura superficial interior do vão envidraçado:

- Tipo de vidro;
- Tipo de caixilharia,
- Tipo de proteção solar;
- Condições exteriores (temperatura do ar, humidade relativa, direção e velocidade do vento, radiação solar);
- Condições interiores (temperatura do ar, temperaturas superficiais, humidade relativa, velocidade do ar).

iii) Fatores humanos:

- Nível de atividade;
- Tipo de vestuário;
- Localização.

Para avaliar a influência dos vãos envidraçados nas condições de conforto térmico, teremos de avaliar como os vãos envidraçados afetam as trocas de calor entre os ocupantes e o ambiente interior. Trocas de calor com o corpo assimétricas resultarão em temperaturas da pele diferentes independentemente da temperatura interior resultante, uma combinação que pode provocar sensações e desconforto térmicos.

#### 2.3.5.2. Modelo de Conforto UCB

Na Universidade da Califórnia foi desenvolvido um modelo do conforto térmico em ambientes com assimetria térmica, UCB - *Berkeley Comfort Model*, o modelo prevê o conforto térmico de um indivíduo para as diferentes partes do corpo ou para todo o corpo. O modelo foi desenvolvido tendo por base um grande número de ensaios realizados no ser humano em ambientes térmicos variáveis e assimétricos [103]. Ao simular num ambiente interior com janelas, o modelo do conforto UCB prevê a sensação global de conforto térmico “*Overall Sensation*” para todas as partes do corpo, que são influenciadas pelas trocas de calor radiante com o vão envidraçado, os ganhos de calor pela radiação solar, o movimento do ar, e as variações das temperaturas do ar, e fornece um índice de conforto térmico local “*Minimum Local Comfort*” de todo o corpo tendo em conta o conforto das várias partes do corpo [104], [105].

O modelo UCB é composto por dois modelos: o modelo da sensação global (sensação térmica de todo o corpo) inclui as sensações locais para fornecer uma avaliação global de todo o corpo e o modelo de conforto global (conforto térmico de todo o corpo) inclui o conforto local para fazer uma avaliação do

conforto térmico de todo o corpo. Estes dois modelos estão ligados à temperatura da pele e à temperatura interna do corpo humano de forma indireta [104].

O modelo UCB do conforto divide o corpo em 16 partes. Cada parte é dividida em interior, músculo, gordura e nas camadas da pele. Um modelo subjacente ao sistema da circulação do sangue simula as trocas de calor entre as camadas do tecido, tais como o músculo e a pele [102]. O modelo divide a superfície do corpo humano em mais de cinco mil polígonos para calcular a transferência de calor por radiação entre o corpo e o ambiente. Consequentemente, a transferência de calor entre o corpo e as superfícies com assimetria térmica, tais como as paredes que contêm janelas, pode ser calculada com grande detalhe.

A figura 2.30 mostra a interface do modelo do conforto UCB. O exemplo apresentado descreve o conforto devido à radiação solar (mostrada na imagem grande no centro), as mãos, e os braços, e a sensação de calor na cabeça (imagem inferior à direita, as cores quentes (vermelho) apresentam a sensação de calor). Em consequência, estas partes do corpo estão desconfortáveis (imagem média, do amarelo ao preto apresenta o desconforto de incómodo a muito incómodo). A sensação total é mostrada na figura superior (a cor vermelha representa o estado de quente), e o conforto total é mostrado na figura superior à esquerda (incómodo). Os níveis totais de sensação e do conforto são apresentados também numericamente ao lado das figuras. Os dados da direita superior mostram os valores da sensação do conforto para cada parte do corpo e para todo o corpo. Os dados podem também mostrar a temperatura da pele, do interior, do músculo, da gordura, as perdas de calor, etc., com base nas seleções do utilizador (decisor). O gráfico no fundo ao centro mostra a variação dos resultados para os parâmetros que o utilizador selecionou.

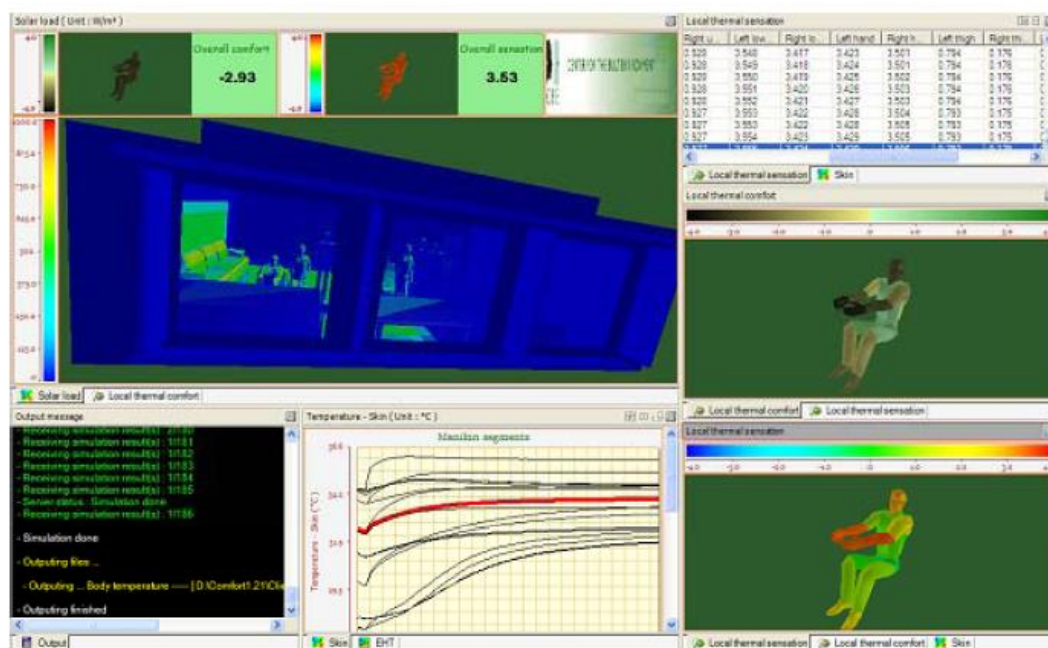


Fig.2.30. – Imagens do interface do modelo de conforto UCB [102]

Para avaliar a influência dos vãos envidraçados nas condições de conforto térmico humano, mais propriamente, o conforto em ambientes assimétricos, foi desenvolvido pelo CBE – *Center for the Built Environment*, EUA em 2006, o projeto de pesquisa intitulado de “*Window Performance for Human Thermal Comfort*” [102]. No relatório final foi feita a comparação entre os modelos de conforto PMV e UCB em relação à sensação térmica global e aos limites de conforto térmico obtidos.

Foram realizadas simulações para um compartimento com 6,00 m de largura e de profundidade e 3,00 m de pé-direito, com uma janela de 6,00 m por 3,00 m (dimensão de uma parede) e o ocupante localizado a 1,00 m do centro do vão envidraçado. O compartimento tem uma temperatura uniforme de 25,7 °C, representando a temperatura neutra em que a sensação global é igual a 0, para uma pessoa sentada afastada 1,00 m da janela, com uma atividade metabólica de 1,0 met e uma resistência térmica da roupa de 0,59 clo. Fez-se variar a temperatura superficial interior do vão envidraçado de -10 °C a 56 °C [102].

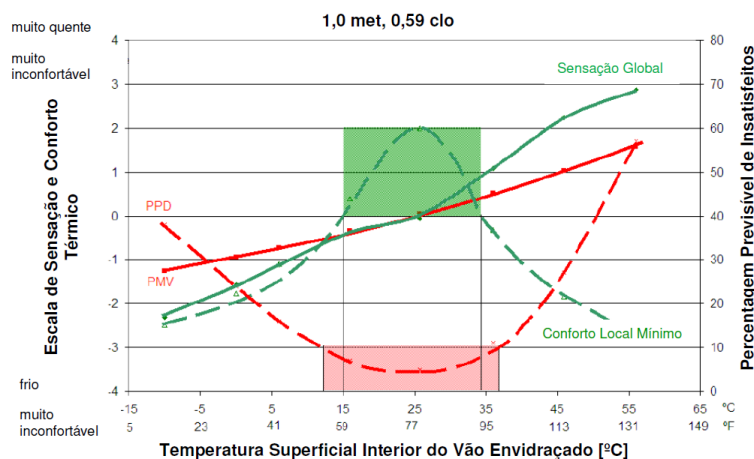


Fig.2.31. – Sensação global e os limites de conforto térmico – Modelo PMV vs Modelo UCB, adaptado de [102]

Ao observar a figura 2.31 conclui-se que, quando a temperatura superficial interior do vão envidraçado permanece no meio da escala de temperaturas (15 °C a 35 °C – quando  $-0,5 < PMV < +0,5$ ), a diferença entre o modelo PMV e o modelo UCB é relativamente pequena, inferior a 0,5. Quando a temperatura superficial interior do vão envidraçado se encontra mais fria ou mais quente a diferença entre os dois modelos torna-se maior. Porque o modelo PMV apenas avalia a transferência de calor total entre o corpo e o ambiente, é menos sensível às assimetrias e ao efeito causado pela existência do vão envidraçado. O modelo UCB calcula a variação na sensação para as diferentes partes do corpo causadas pelo vão envidraçado e pelos fatores individuais e a sua influencia na avaliação da sensação global [102].

No relatório final de pesquisa intitulado de “*Window Performance for Human Thermal Comfort*” [102], foi então aplicado o modelo de conforto UCB para avaliar o efeito do desempenho do vão envidraçado no conforto térmico humano. Para tal foram consideradas dez janelas com combinações diferentes de vidro e caixilharia (apresentadas na figura 2.32, obtendo vãos envidraçados com diferentes coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ), logo com desempenho térmico diferentes. O objetivo era determinar o valor mínimo permitido para a temperatura exterior a partir do qual uma pessoa, colocada a 1,00 m do vão envidraçado não sentisse nenhum desconforto local.

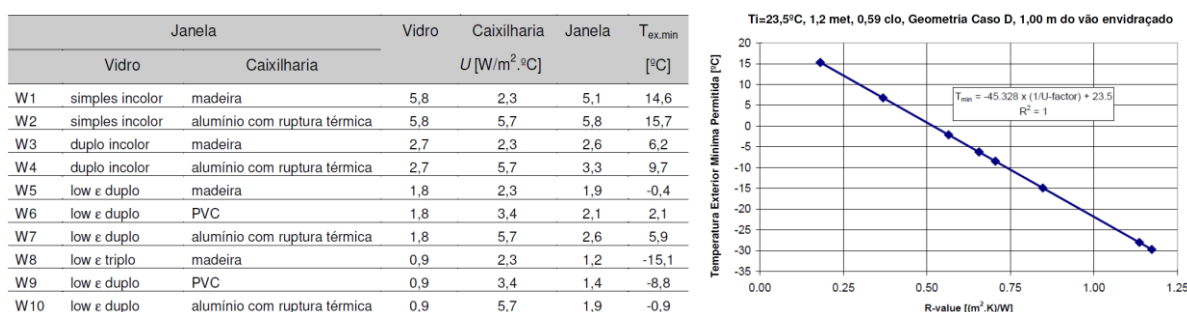


Fig.2.32. – Regressão linear entre a resistência térmica e a temperatura mínima exterior, adaptado de [102]

Da análise pode concluir-se que existe uma relação direta entre os índices de conforto e o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado em função da temperatura do ar exterior, da geometria do vão envidraçado e da localização do ocupante (nível de atividade e tipo de vestuário).

### 2.3.5.3. Outros Estudos

Harris Poirazis, em 2006, apresentou uma revisão bibliográfica sobre avaliação das condições de conforto no interior dos edifícios, com o objetivo de descrever o conceito da Dupla Fachada Ventilada “*Double Skin Facades*” com base em diferentes referências bibliográficas, incluído questões de modelação, o fluxo de ar e as simulações térmicas [106]. Para ser integrado no relatório do Anexo 43 da IEA [72].

Para analisar as condições de conforto térmico na proximidade do vão envidraçado devido à assimetria de temperatura radiante, na presença de radiação solar sobre os ocupantes, é necessário identificar as áreas do compartimento que podem ser afetadas, Maria La Gennusa e outros em 2005 [62] e 2007 [6] fizeram estudos com este propósito, tendo em consideração o efeito da radiação solar na temperatura média radiante, utilizando as equações 2.12 e 2.13 apresentadas atrás. Tendo concluído que o método proposto (ferramenta analítica) para o cálculo dos fatores de forma entre os ocupantes e as superfícies circundantes permite calcular a contribuição da componente direta e difusa da energia da radiação solar que entra num espaço para um determinado local. Além disso, pode ser utilizado para refinar o cálculo do equilíbrio térmico do corpo humano (sentado e de pé) e pode, ainda, ser útil para a certificação energética de edifícios, tal como estabelecido na Diretiva 2010/31/UE [7]. E obviamente esse tipo de informação é de muita importância para um projeto adequado de sistemas de AVAC.

Ainda sobre o efeito da radiação solar no interior dos edifícios, Mark Bessoudo e outros, em 2010 [57], realizaram um estudo experimental do ambiente térmico nos edifícios próximo de uma fachada altamente envidraçada com diferentes tipos de dispositivos de sombreamento, sob diversas condições climáticas no inverno, figura 2.33. Foi medida a temperatura interior nos vidros e nos dispositivos de sombreamento, a temperatura operativa e a assimetria da temperatura radiante para diferentes posições das persianas ou dos estores venezianos. Por fim, apresentam um modelo térmico dinâmico “*a transient building shading model*” para calcular os índices de conforto interior devido ao efeito da radiação solar. Os resultados são comparados com as medições.

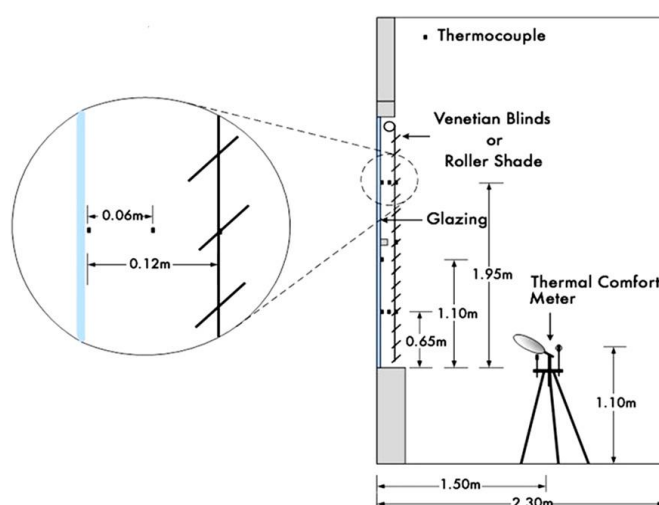


Fig.2.33. – Posicionamento das sondas e dos transdutores de medição dos parâmetros ambientais [57]

A figura 2.34, apresenta os valores obtidos para os parâmetros ambientais nas zonas próximas do vão envidraçado (1,50 m) sem e com dispositivo de proteção (estores veneziano com as lâminas na horizontal).

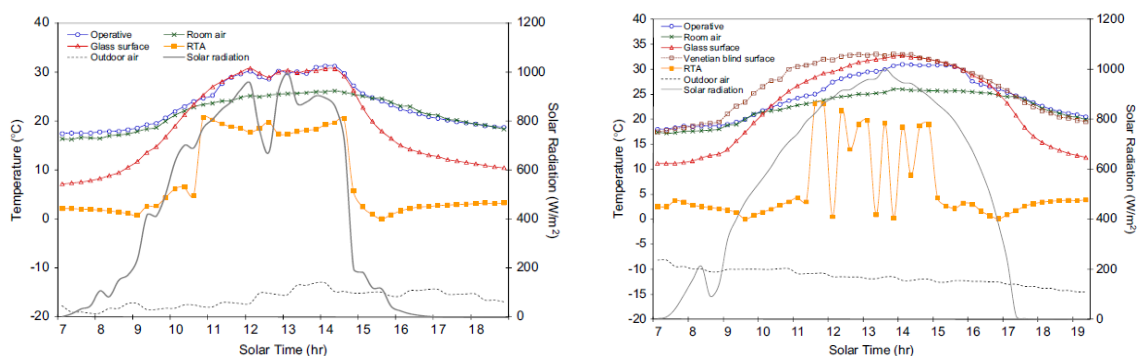


Fig.2.34. – Valores obtidos para dias de inverno, à esquerda sem dispositivo de proteção e à direita com estore veneziano [57]

Os autores deste estudo concluíram que, mesmo sob temperaturas exteriores muito frias, a temperatura na superfície interior do vidro pode ser bastante elevada durante o dia, obtendo-se temperaturas operativas e assimetrias da temperatura radiante (RTA) também elevadas que causam desconforto. A utilização de dispositivos de proteção claros durante o dia no inverno pode melhorar o ambiente térmico dos edifícios, minimizando a quantidade de radiação solar incidente diretamente no ocupante, quando se utilizam estores venezianos esse efeito está dependente da inclinação das lâminas.

Valentina Serra, Fabio Zanghirella e Marco Perino, realizaram um estudo experimental sobre fachadas ventiladas (ativa) [108] e apresentam as medições realizadas utilizando duas células de teste iguais (TWINS — *Testing Window Innovative System*), que consiste em duas células exteriores, uma utilizada como referência, e a outra equipada com diferentes configurações de fachada ativa, figura 2.35. Foram avaliadas a eficiência energética da fachada e as implicações de conforto térmico, considerando a capacidade de pré-aquecer o ar de ventilação na estação do inverno, e a capacidade de remover parte da carga de energia solar durante o verão, foi analisada a energia diária que passa através da fachada e a temperatura da superfície interior do vidro. Foi investigada a melhoria no desempenho obtido através da variação das condições de configuração e funcionamento (taxa de ventilação, dispositivo de sombreamento e vão interior).

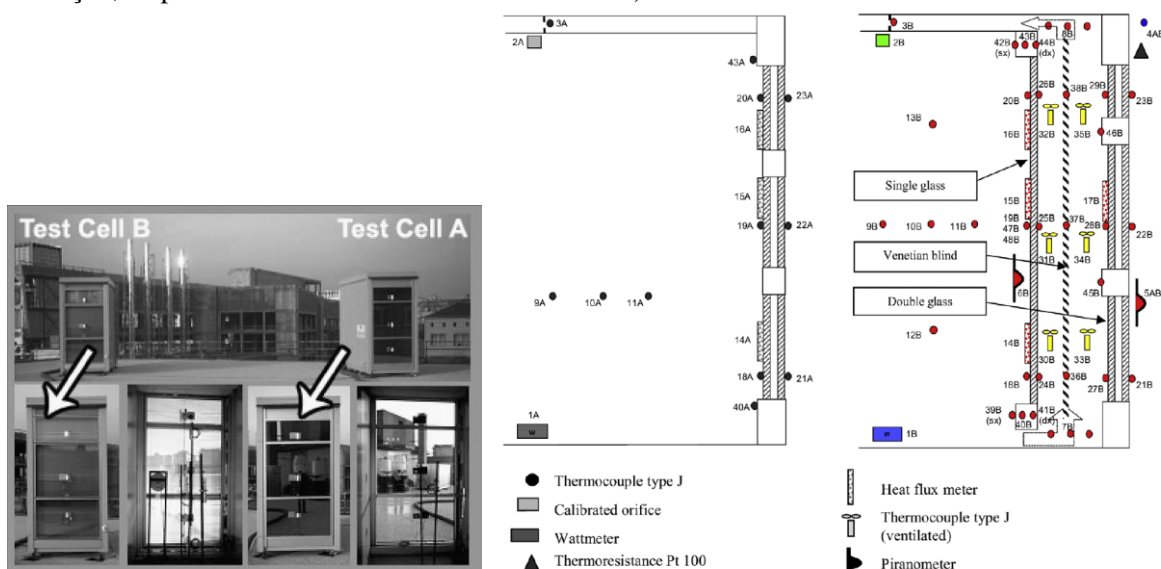


Fig.2.35. – Células de teste e localização do equipamento de monitorização utilizado [108]



# 3

## AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

### 3.1. INTRODUÇÃO

Para apresentar a avaliação experimental do desempenho térmico e do conforto térmico no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos envidraçados relativa a dois espaços de um estabelecimento de ensino superior, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, ESTGV, consideraram-se quatro subcapítulos. No primeiro subcapítulo definem-se os objetivos e a metodologia utilizada. No segundo subcapítulo faz-se a descrição e caracterização dos espaços analisados e medições efetuadas. No terceiro subcapítulo faz-se a análise dos resultados obtidos em relação ao desempenho e ao conforto térmico. E por fim no quarto subcapítulo apresentam-se algumas conclusões. Estes subcapítulos são detalhados a seguir.

### 3.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Com esta avaliação experimental “estudo de campo” pretende-se aferir sobre as condições de conforto térmico no centro dos espaços e nas zonas próximas dos vãos envidraçados (1,20 m do vão envidraçado), tendo em consideração a geometria dos espaços, a sua localização, a orientação e a percentagem dos vãos envidraçados em relação à área de pavimento, a utilização de dispositivos de sombreamento e de proteção solar nos vãos envidraçados e a abertura dos mesmos, para as condições de verão, de inverno e meia estação (outono e primavera).

Para a avaliação do conforto térmico são aplicados os Índices analíticos PMV e PPD, proposto pelas normas EN ISO 7 730:2005 [40], Norma Europeia EN 15 251:2007 [46], o método gráfico simplificado de avaliação do conforto térmico, proposto pela norma ASHRAE 55:2010 [37], complementando-se com a utilização dos modelos adaptativos de conforto, proposto na mesma norma ASHRAE 55:2010 [37], proposto na mesma norma EN 15 251:2007 [46] e o proposto pelo LNEC [4].

Tal tarefa reverte-se de inúmeras especificidades e requer uma preparação cuidada. Desta forma, foi delineada uma série de campanhas experimentais de medição, de parâmetros higrotérmicos em dois espaços: de verão “Campanha de Verão – 27 de julho a 14 de setembro”, de inverno “Campanha de Inverno – 21 de dezembro a 20 de março” e meia estação: “Campanha de Outono – 15 de setembro a 20 de dezembro” e “Campanha de Primavera – 21 de março a 20 de junho”. As campanhas de medição assentaram na monitorização em contínuo de parâmetros higrotérmicos e em medições pontuais do caudal de ventilação.

Este estudo de campo decorreu durante um ano com monitorização contínua de parâmetros ambientais (exteriores e interiores), em dois espaços da Escola Superior de Tecnologia Gestão de Viseu, uma sala de aulas e um gabinete, sob diferentes condições de medição, nomeadamente: sombreamento

horizontal; utilização dispositivos de proteção solar; abertura dos vãos envidraçados, circulação do ar no interior dos espaços, ocupação e aquecimento ambiente. Com os seguintes objetivos:

- Avaliar as condições de conforto térmico no centro dos espaços e nas zonas próximas dos vãos envidraçados;
- Aferir sobre a aplicação dos modelos de conforto térmico adotados;
- Avaliar o efeito da utilização de dispositivos de sombreamento;
- Avaliar o efeito da utilização de dispositivos de proteção solar;
- Avaliar o efeito da abertura dos vãos envidraçados;
- Avaliar o efeito da circulação do ar no interior dos espaços;
- Aferir sobre o efeito da radiação solar no interior dos espaços;
- Aferir sobre o efeito da geometria dos espaços e percentagem dos vãos envidraçados.

### 3.3. DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS ESPAÇOS ANALISADOS E MEDIÇÕES EFETUADAS

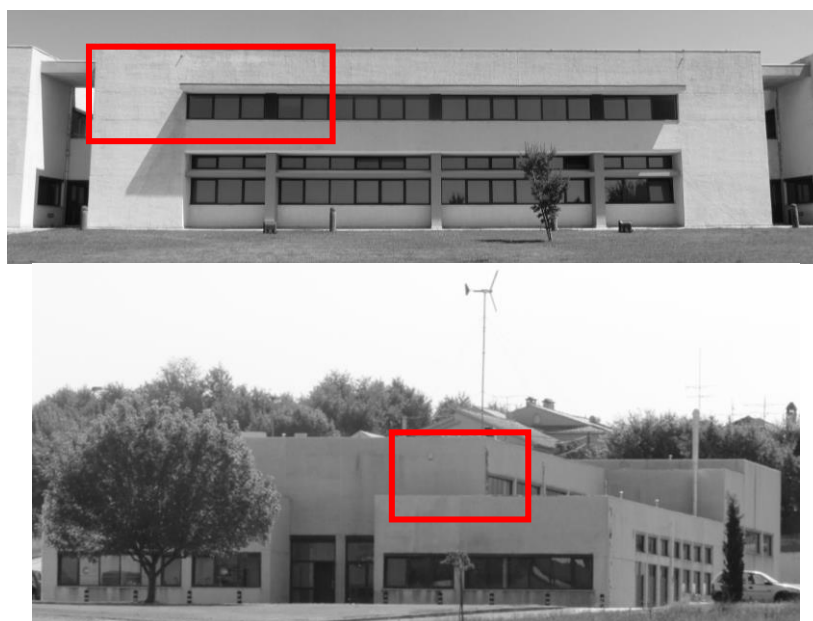
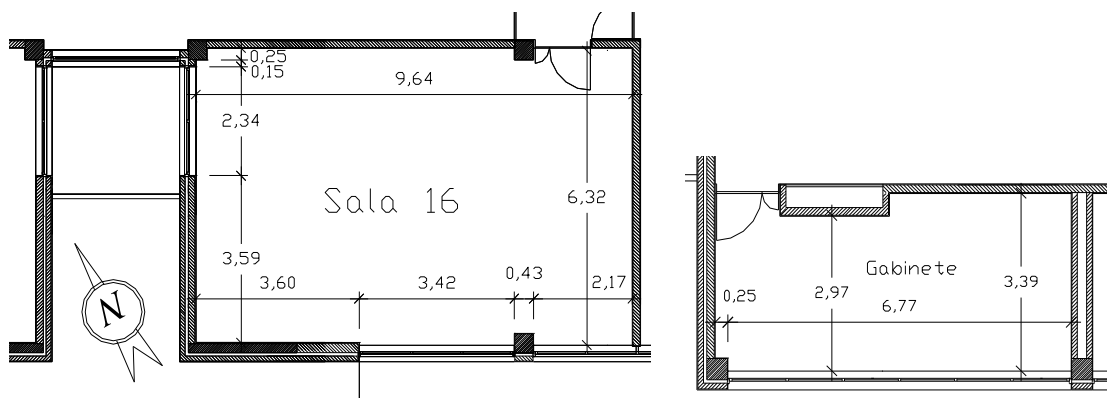
#### 3.3.1. DESCRIÇÃO GERAL DOS ESPAÇOS ANALISADOS

Como já foi referido anteriormente, o estudo de campo foi realizado numa sala de aulas e num gabinete da Escola Superior de Tecnologia Gestão de Viseu, figura 3.1. Os edifícios onde estão localizados os espaços em estudo foram construídos nos anos 90 (orientação principal NE/SW), com paredes exteriores duplas com isolamento térmico na caixa-de-ar e coberturas planas com isolamento térmico sobre a tela de impermeabilização, sendo a ventilação natural (infiltrações) a principal ventilação dos espaços em estudo. A sala de aulas encontra-se no edifício pedagógico e o gabinete encontra-se no pavilhão oficial Gabriel Afonso. Os edifícios estão localizados no Concelho de Viseu, inserida na Zona Climática Dão Lafões I<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>: Latitude: 40°38'37,27'' N; Longitude 7°55'11.58'' W; Altitude: 476 m. Na figura 3.2, é apresentada parte da fachada SW do edifício onde está localizada a sala de aulas monitorizada e o edifício onde está localizado o gabinete monitorizado. Durante os períodos em estudo os referidos espaços não tiveram qualquer tipo de ocupação. No quadro 3.1 faz-se uma caraterização geral desses espaços.

Quadro 3.1. - Caraterísticas gerais dos espaços em estudo

	Sala de Aulas	Gabinete
Piso	2.º	2.º
Área de Pavimento (Ap)	61,10 m <sup>2</sup>	22,80 m <sup>2</sup>
Profundidade	6,37 m	3,40 m
Pé direito	3,20 m	3,10 m
Vãos Envidraçados	2	1
Tipo de Vidro	Duplo Incolor (6 + 10 + 4 mm)	Duplo Incolor (6 + 10 + 4 mm)
Caixilharia	Alumínio sem corte térmico	Alumínio sem corte térmico
Orientação	SW (210º) - 6,60 m <sup>2</sup> (11% de Ap) NW (300º) - 3,45 m <sup>2</sup> (5,6% de Ap)	SW (210º) - 8,80 m <sup>2</sup> (35% de Ap) -
Proteção Solar	SW (210º) - estores venezianos int.	SW (210º) - estores venezianos int.
Sombreamento	SW (210º) - pala horizontal com 1,00 m NW (300º) – Edifício	- -
Ventilação Interior	Grelha na porta (54 x 37,3 cm)	-





### 3.3.2. CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE

O desempenho térmico de um edifício depende muito das propriedades dos elementos construtivos da sua envolvente exterior e interior. Qualquer tentativa de interpretação dos resultados obtidos na campanha de monitorização tem de ser realizada tendo por base as soluções construtivas dos edifícios em estudo. Como já foi referido anteriormente, os edifícios onde estão localizados os espaços em estudo foram construídos nos anos 90, as soluções construtivas utilizadas nos dois edifícios são iguais, com paredes exteriores duplas com isolamento térmico na caixa-de-ar e coberturas planas com isolamento térmico sobre a tela de impermeabilização.

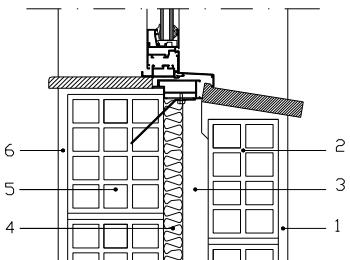
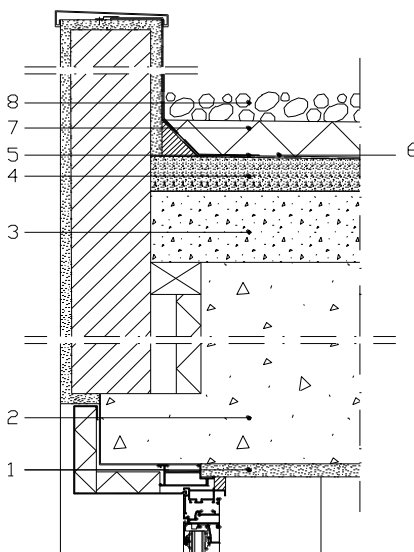
Pretende-se com este ponto fazer a caracterização o mais completa possível da envolvente dos edifícios onde estão localizados os espaços estudados. Para a descrição dos materiais construtivos é especificado a espessura, a condutibilidade térmica, a densidade, o calor específico e a resistência térmica. Para a descrição dos envidraçados é especificado o valor do coeficiente de transmissão térmica, o fator solar e a transmissão luminosa.

Os valores da condutibilidade térmica, da densidade e da resistência térmica foram retirados do ITE 50 [19]. Os valores para o calor específico são resultantes de pesquisas no livro ASHRAE – Handbook of Fundamentals [38] e de pesquisa na internet [122].

### 3.3.2.1. Caracterização da Envolvente Opaca

No quadro 3.2 apresenta-se uma descrição geral da constituição da parede exterior e da cobertura, as características térmicas, para todos os elementos construtivos, para cada elemento construtivo os materiais e as suas propriedades térmicas e os respetivos coeficientes de transmissão térmica,  $U$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ] são apresentados no Anexo B.

Quadro 3.2. – Caracterização da envolvente opaca

Elemento Construtivo	Descrição	Pormenor Construtivo
Parede Exterior	1 - Reboco em Mono-massa 2 – Tijolo furado 3 – Espaço de ar 4 – Isolamento térmico (EPS) 5 – Tijolo furado 6 - Reboco em estuque projetado	
Cobertura	1 - Reboco em estuque projetado 2 - Laje fungiforme 3 - Camada de forma 4 - Betonilha de regulação 5 - Impermeabilização (PVC) 6 – Geotextil 7 - Isolamento térmico (XPS) 8 - Proteção em godo lavado	

### 3.3.2.2. Caracterização dos Vãos Envidraçados

Os vãos envidraçados exteriores dos dois edifícios são constituídos por caixilharia de alumínio sem corte térmico, fixas e oscilo-batente, e com vidro duplo incolor (6 mm + 10 mm + 4 mm), as proteções solares, quando existentes, são estores venezianos interiores com lâminas de alumínio. Os vãos envidraçados interiores, em contato com o corredor, dos dois edifícios são constituídos por caixilharia de madeira, fixa, e com vidro simples incolor de 6 mm. No quadro 3.3 são apresentados o coeficiente de transmissão térmica ( $U$  e  $U_{wdn}$ ) e fator solar ( $g_T$ ) dos dois tipos de vãos envidraçados, valores extraídos do programa *DesignBuilder* [11] após se ter criado o elemento construtivo.

Quadro 3.3. – Constituição dos vãos envidraçados

Material	Propriedades	Considerações
Vidro duplo (6 + 10 + 4 mm)	$U_{Wdn} = 2,791 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $g = 0,723$	
Caixilharia em alumínio sem corte térmico	$U = 5,88 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	
Estores venezianos interiores em alumínio de cor verde-garrafa	$g_T = 0,678$	Na sala de aulas os estores estão a 2 cm do vão e no gabinete estão a 20 cm
Vidro simples (6 mm)	$U_W = 5,778 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ $g_T = 0,819$	
Caixilharia em madeira	$U = 2,823 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	

## 3.3.3. DESCRIÇÃO DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

Durante as campanhas de medição foram registados os parâmetros do ambiente exteriores, com intervalos de 3 minutos, para a elaboração de um ficheiro climático e para obter a temperatura média mensal e a temperatura exterior exponencialmente ponderada, nomeadamente: a temperatura do ar; a temperatura de ponto de orvalho; a humidade relativa; a velocidade e direção do vento; a radiação solar global em superfície horizontal e a pressão atmosférica. Para o registo da temperatura do ar e da humidade relativa foi utilizado um data logger Hobo H08-03-02 [123] [124] com uma precisão de  $\pm 0,7^\circ\text{C}$  e uma resolução de  $0,4^\circ\text{C}$ , para medições de temperatura, e uma precisão de  $\pm 5\%$  em relação ao registo da humidade relativa. A pressão atmosférica e direção e velocidade do vento foram registadas pela estação meteorológica “La Crosse” [125] com uma resolução de  $0,1 \text{ m/s}$  em relação à velocidade e de  $22,5^\circ$  em relação à direção do vento. A radiação solar global em superfície horizontal foi registada por um piranómetro, com sensibilidade entre  $60$  e  $100 \mu\text{V/W/m}^2$ , ligado a um data-logger “Mikromec<sup>(R)</sup> Multisens” [126].

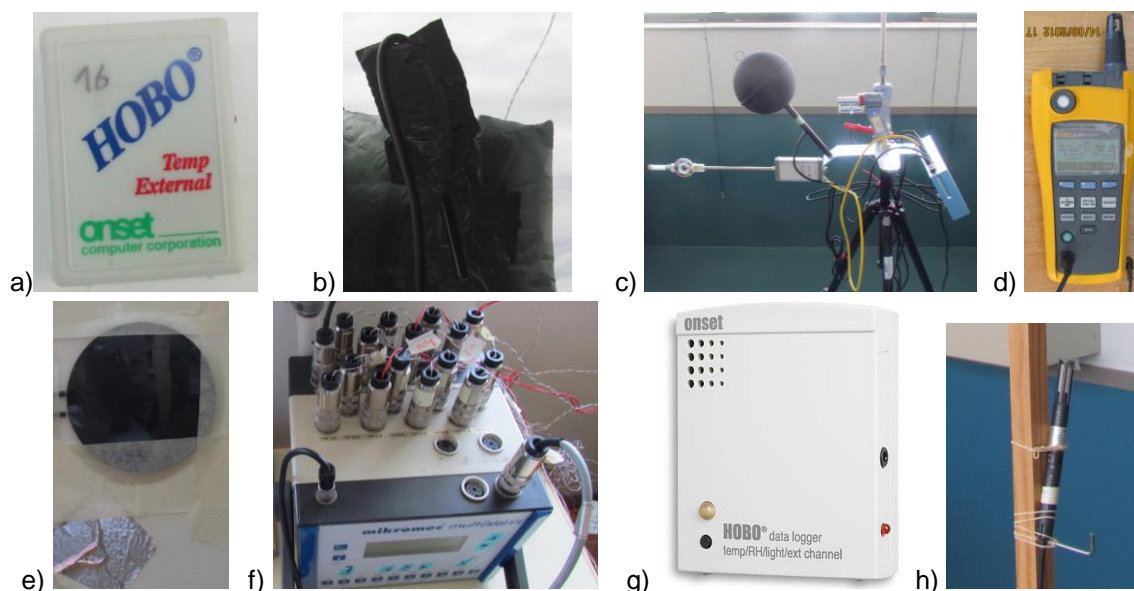


Fig.3.3. – Equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais

Em relação aos espaços em estudo, foram registados parâmetros do ambiente interior, também em intervalos de 3 minutos, utilizado o seguinte equipamento portátil de registo, figura 3.3: a) data logger Hobo H08-02/3-02 [124] (temperaturas do ar e humidade relativa); b) extensão do data-logger Hobo

H08-02/3-02 (temperaturas do ar entre o vidro e o estore); c) estação microclimática “Babuc ABC” [127] (temperaturas do ar, temperatura do globo, humidade relativa, velocidade do ar, radiação líquida interior, assimetria radiante) – alinhado com o centro do vão e afastado 1,20 m do vão envidraçado; d) analisador da qualidade do ar “Fluke 975” [128] (temperaturas do ar, humidade relativa, velocidade do ar, CO<sub>2</sub>) – alinhado com o centro do vão e afastado 1,20 m do vão envidraçado, e) fluxímetros (fluxo de calor), f) data logger “Mikromec<sup>(R)</sup> Multisens” e termopares do tipo T (temperatura superficial), g) data logger Hobo U12-012 [129] (com uma precisão de  $\pm 0,35$  °C e uma resolução de 0,03 °C para a medição de temperatura e uma precisão de  $\pm 2,50\%$  e uma resolução de 0,03% para o registo da humidade relativa) e h) sonda de temperatura e humidade relativa também ligada ao data logger “Mikromec<sup>(R)</sup> Multisens”) localizada no centro do espaço. Também foi efetuada esporadicamente a caracterização da ventilação com a utilização do método do decaimento do gás traçador para várias condições de envolvente.

As figuras 3.4 e 3.5 apresentam a localização do equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais. As sondas colocados a 1,20 m do vão envidraçado para o registo de temperatura e humidade relativa (Hobo, a estação Babuc ABC e o Fluke 975) foram colocados a 1,10 m de altura do pavimento, de acordo com o especificado na norma EN ISO 7 726:2001 [45].

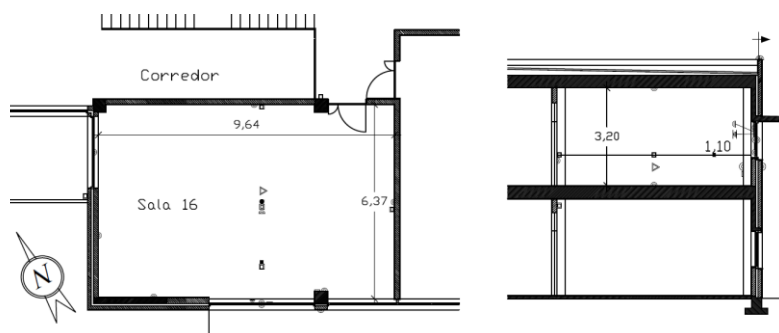


Fig.3.4. – Localização do equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais na sala de aulas

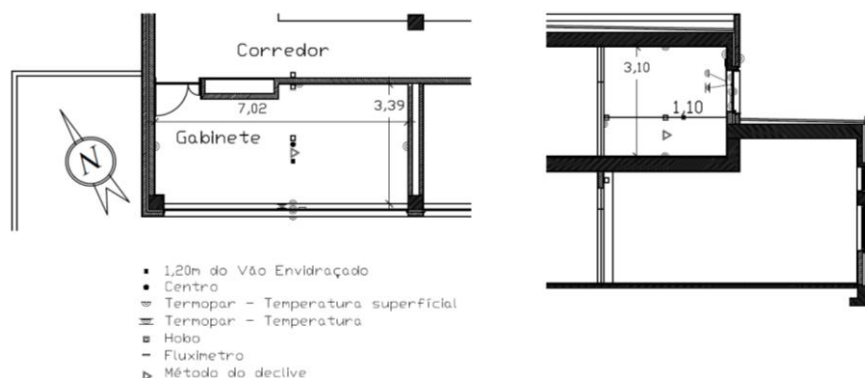


Fig.3.5. – Localização do equipamento de medição e de registo de parâmetros ambientais no gabinete

Durante as campanhas de medição foram consideradas várias condições de medição referentes à proteção solar dos vãos envidraçados, através da utilização dos estores venezianos interiores em alumínio de cor verde-garrafa e à circulação do ar interior, recorrendo à abertura dos vãos envidraçados (abertura do modo basculante das partes móveis do vão envidraçado, correspondendo a cada uma a área útil de abertura de 0,36 m<sup>2</sup>) e à utilização de duas ventoinhas de 30 W em cada espaço. A análise dos resultados obtidos foi efetuada tendo em consideração as condições climáticas exteriores relativas à radiação solar (céu limpo ou encoberto), com exceção da campanha de verão em que se considerou apenas, céu limpo. Durante as campanhas de outono, inverno e primavera, em

relação às condições interiores, o facto de o aquecimento (aquecimento central a gás natural com circulação de água quente) estar ligado ou desligado (L ou D).

Nos quadros 3.4 e 3.5 são apresentados os períodos e as condições de medição.

Quadro 3.4. - Períodos e condições de medição no 1.º Ano

Campanha	Sala de Aulas (S)		Gabinete (G)	
	Condições de Medição	Período	Condições de Medição	Período
Verão (V)	V1 Estore 0%	(31 julho a 02 agosto) <sup>1</sup>	Estore 0%	(31 julho a 02 agosto) <sup>1</sup>
	V2 Estore 100% (0°)	(04 a 05 de agosto) <sup>1</sup>	Estore 100% (0°)	(04 a 05 de agosto) <sup>1</sup>
	V3 Estore 100% (0°) + 2V	(19 a 20 de agosto) <sup>1</sup>	Estore 100% (0°) + 2V	(15 a 16 de agosto) <sup>1</sup>
	V4 Estore 100% (0°) + 4J	(22 a 23 de agosto) <sup>1</sup>	Estore 100% (0°) + 2J	(22 a 23 de agosto) <sup>1</sup>
	V5 Estore 100% (90°)	(29 a 30 de agosto) <sup>1</sup>	Estore 100% (90°)	(29 a 30 de agosto) <sup>1</sup>
	V6 Estore 0%	(25 a 27 de agosto) <sup>1</sup>	-	-
Outono (O)	O1 Estore 0% (D)	(02 a 04 de outubro) <sup>1</sup> (16 a 18 de outubro) <sup>2</sup>	Estore 0% (D)	(02 a 04 de outubro) <sup>1</sup> (16 a 18 de outubro) <sup>2</sup>
	O2 Estore 100% (90°) (D) (O)	(26 out. a 01 novembro) <sup>1</sup> (03 a 04 de novembro) <sup>2</sup>	Estore 100% (90°) (D)	(26 out. a 01 nov.) <sup>1</sup> (03 a 04 de novembro) <sup>2</sup>
	O3 Estore 100% (90°) (L) (O)	(12 a 14 de novembro) <sup>1</sup> (15 a 17 de novembro) <sup>2</sup>	Estore 100% (90°) (L)	(12 a 14 de novembro) <sup>1</sup> (15 a 17 de novembro) <sup>2</sup>
	O4 Estore 100% (0°) (L) (O)	(26 a 27 de novembro) <sup>1</sup> (23 a 25 de novembro) <sup>2</sup>	Estore 100% (0°) (L)	(26 a 27 de novembro) <sup>1</sup> (23 a 25 de novembro) <sup>2</sup>
	O5 Estore 0% (L) (O)	(28 a 30 de novembro) <sup>1</sup> (13 a 18 de dezembro) <sup>2</sup>	Estore 0% (L)	(28 a 30 de novembro) <sup>1</sup> (13 a 18 de dezembro) <sup>2</sup>

1) Céu limpo; 2) Céu encoberto; J) Janela oscilo-batente com o modo basculante aberto; V) Ventoinhas de 30 W; Estore) Estore veneziano; L/D) Aquecimento no espaço ligado ou desligado; O) Sala de aulas com ocupação; 0%) Estore 0% ativado; 100%) Estore 100% ativado; 0°) Estore com a lâmina na posição horizontal; 90°) Estore com a lâmina na posição vertical.

Quadro 3.5. - Períodos e condições de medição no 2.º Ano

Campanha	Sala de Aulas (S)		Gabinete (G)	
	Condições de Medição	Período	Condições de Medição	Período
Inverno (I)	I1 Estore 0% (D)	(27 a 29 de dezembro) <sup>1</sup> (30 dez. a 01 janeiro) <sup>2</sup>	Estore 0% (D)	(27 a 29 de dezembro) <sup>1</sup> (30 dez. a 01 janeiro) <sup>2</sup>
	I2 Estore 0% (L) (O)	(04 a 06 de janeiro) <sup>1</sup> (07 a 09 de janeiro) <sup>2</sup>	Estore 0% (L)	(04 a 06 de janeiro) <sup>1</sup> (07 a 09 de janeiro) <sup>2</sup>
	I3 Estore 100% (0°) (L) (O)	(10 a 15 de janeiro) <sup>1</sup> (16 a 17 de janeiro) <sup>2</sup>	Estore 100% (0°) (L)	(10 a 15 de janeiro) <sup>1</sup> (16 a 17 de janeiro) <sup>2</sup>
	I4 Estore 100% (90°) (L) (O)	(21 a 22 de janeiro) <sup>1</sup> (18 a 20 de janeiro) <sup>2</sup>	Estore 100% (90°) (L)	(21 a 22 de janeiro) <sup>1</sup> (18 a 20 de janeiro) <sup>2</sup>
	I5 Estore 0% (L) (O)	(03 a 09 de fevereiro) <sup>1</sup> (10 de fevereiro) <sup>2</sup>	Estore 0% (L)	(03 a 09 de fevereiro) <sup>1</sup> (10 de fevereiro) <sup>2</sup>
	I6 Estore 100% (45°) (D)	(21 a 25 de fevereiro) <sup>1</sup> (17 de fevereiro) <sup>2</sup>	Estore 100% (45°) (D)	(21 a 25 de fevereiro) <sup>1</sup> (17 de fevereiro) <sup>2</sup>
Primavera (P)	P1 Estore 0% (L)	(22 a 24 de março) <sup>1</sup> (25 a 27 de março) <sup>2</sup>	Estore 0% (L)	(22 a 24 de março) <sup>1</sup> (25 a 27 de março) <sup>2</sup>
	P2 Estore 100% (90°) (D)	(13 a 15 de abril) <sup>1</sup> (07 a 12 de abril) <sup>2</sup>	Estore 100% (90°) (D)	(13 a 15 de abril) <sup>1</sup> (07 a 12 de abril) <sup>2</sup>
	P3 Estore 100% (0°) (D)	(23 a 28 de abril) <sup>1</sup>	Estore 100% (0°) (D)	(23 a 28 de abril) <sup>1</sup>
	P4 Estore 100% (45°) (D)	(01 a 05 de maio) <sup>1</sup> (06 a 09 de maio) <sup>2</sup>	Estore 100% (45°) (D)	(01 a 05 de maio) <sup>1</sup> (06 a 09 de maio) <sup>2</sup>
	P5 Estore 0% + 2J (D)	(21 a 25 de maio) <sup>1</sup> (16 a 19 de maio) <sup>2</sup>	Estore 0% + 2J (D)	(21 a 25 de maio) <sup>1</sup> (16 a 19 de maio) <sup>2</sup>
	P6 Estore 100% (0°) + 2J (D)	(31 maio a 05 junho) <sup>1</sup> (07 a 10 de junho) <sup>2</sup>	Estore 100% (0°) + 2J (D)	(31 maio a 05 junho) <sup>1</sup> (07 a 10 de junho) <sup>2</sup>

1) Céu limpo; 2) Céu encoberto; J) Janela oscilo-batente com o modo basculante aberto; V) Ventoinhas de 30 W; Estore) Estore veneziano; L/D) Aquecimento no espaço ligado ou desligado; O) Sala de aulas com ocupação; 0%) Estore 0% ativado; 100%) Estore 100% ativado; 0°) Estore com a lâmina na posição horizontal; 90°) Estore com a lâmina na posição vertical.

### 3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.4.1. INTRODUÇÃO

As campanhas experimentais incidiram na monitorização em contínuo da temperatura do ar, da humidade relativa, das temperaturas superficiais, da velocidade do ar, da temperatura do globo, da radiação líquida interior, da assimetria da temperatura radiante, em intervalos de 3 minutos, com diferentes condições de medição, indicadas nos quadros 3.4 e 3.5 e na medição pontual do caudal de ventilação, indicada no quadro 3.10. Daqui resultou um elevado número de resultados/medições cuja apresentação neste trabalho se considera desnecessária face aos objetivos fixados. Desta forma, são expostos apenas alguns dos resultados obtidos nas medições efetuadas com os vãos envidraçados com o estore 0% ativado, considerados como representativos.

Nas figuras que se seguem são apresentados termogramas tirados com uma câmara de infravermelhos, CAM E300 [130], da fachada dos espaços que estão a ser monitorizados, onde se pode observar a distribuição da temperatura exterior.

Na figura 3.6 apresenta-se a distribuição da temperatura exterior na fachada dos edifícios para o dia 14 de agosto de 2012, pelas 14 horas.

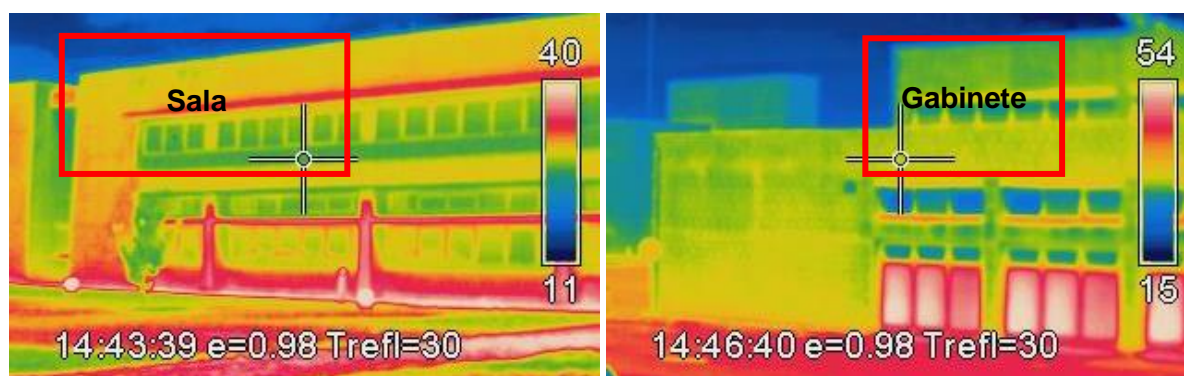


Fig.3.6. – Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica para o dia 14 de agosto de 2012, pelas 14 horas

Na figura 3.17 apresenta-se a distribuição da temperatura exterior na fachada dos edifícios para o dia 21 de agosto de 2012, pelas 16 horas.

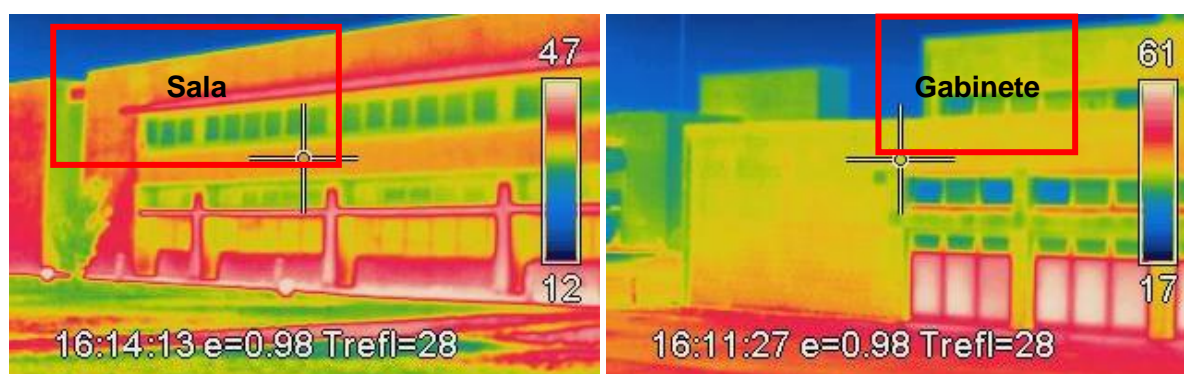


Fig.3.7. – Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica dia 21 de agosto de 2012, pelas 16 horas

Na figura 3.8 apresenta-se a distribuição da temperatura exterior na fachada dos edifícios para o dia 05 de dezembro de 2012, pelas 14 horas.



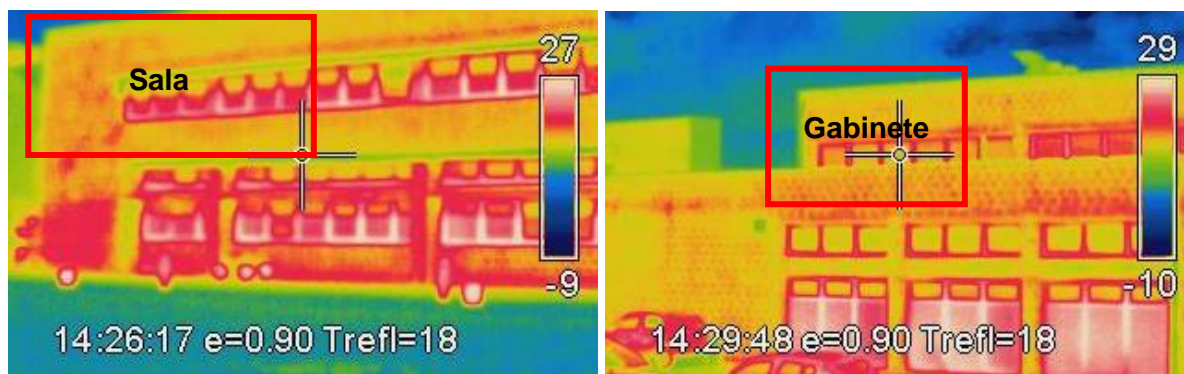


Fig.3.8. – Distribuição da temperatura exterior na fachada: à esquerda o edifício pedagógico e à direita o pavilhão da mecânica dia 05 de dezembro de 2012, pelas 14 horas

O texto que se segue inclui, inicialmente, uma análise dos resultados separadamente para a temperatura do ar e para a humidade relativa em cada um dos espaços no centro (Centro), a 1,20 m do vão envidraçado (1,20 m Vão), a temperatura operativa no centro, a 1,20 m do vão envidraçado e a temperatura superficial do vidro, seguindo-se uma visão conjunta dos parâmetros na avaliação do conforto térmico de cada um dos espaços, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, para as situações de Céu limpo e Céu encoberto.

### 3.4.2. TEMPERATURA DO AR

Nas figuras que se seguem são apresentados os resultados obtidos para a temperatura do ar no interior dos espaços monitorizados, sala de aulas (S) e gabinete (G), junto à parede oposta ao vão envidraçado (Parede Corredor), ao centro (Centro), a 1,20 m do vão envidraçado (1,20 m Vão) e junto ao vidro, entre o vidro e o estore, (Vão/Estore).

As figuras 3.9 e 3.10 mostram os resultados obtidos na monitorização da temperatura do ar interior para a situação com os vãos envidraçados com o estore 0% ativado durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da temperatura exterior e da radiação solar global em superfície horizontal.

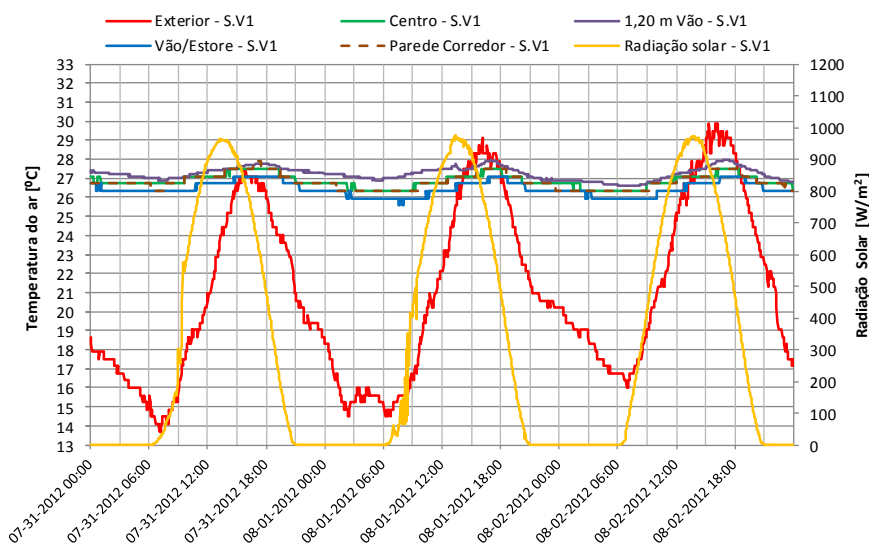


Fig.3.9. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (V1) para céu limpo, na sala de aulas

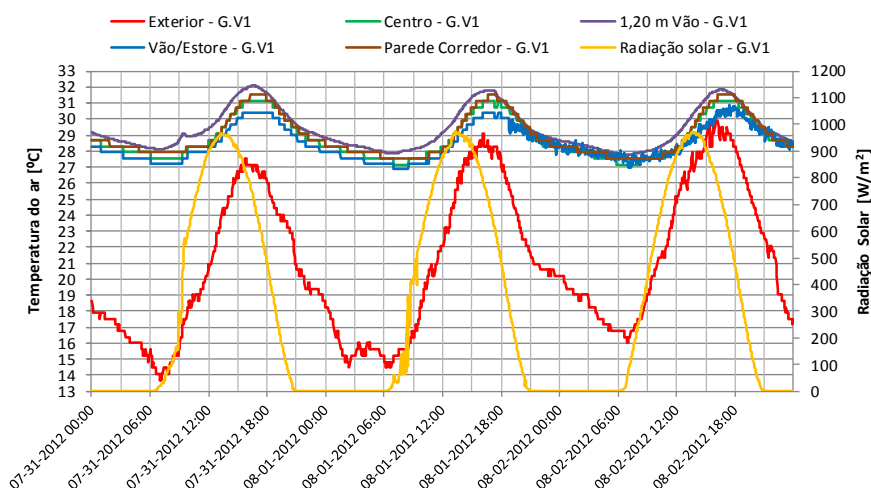
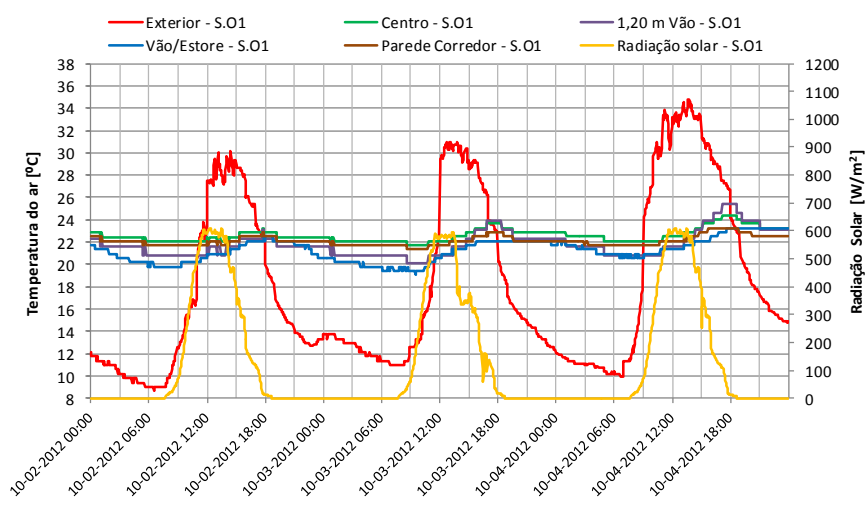
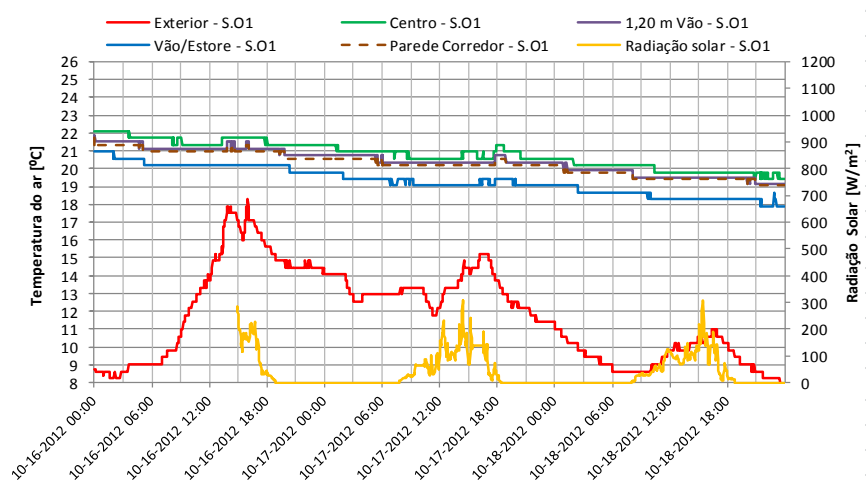


Fig.3.10. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (V1) para céu limpo, no gabinete

As figuras 3.11 e 3.12 mostram os resultados obtidos na monitorização da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Outono (O1) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da temperatura exterior e da radiação solar global em superfície horizontal.



a)



b)

Fig.3.11. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (O1), na sala de aulas: a) Céu limpo; b) Céu encoberto



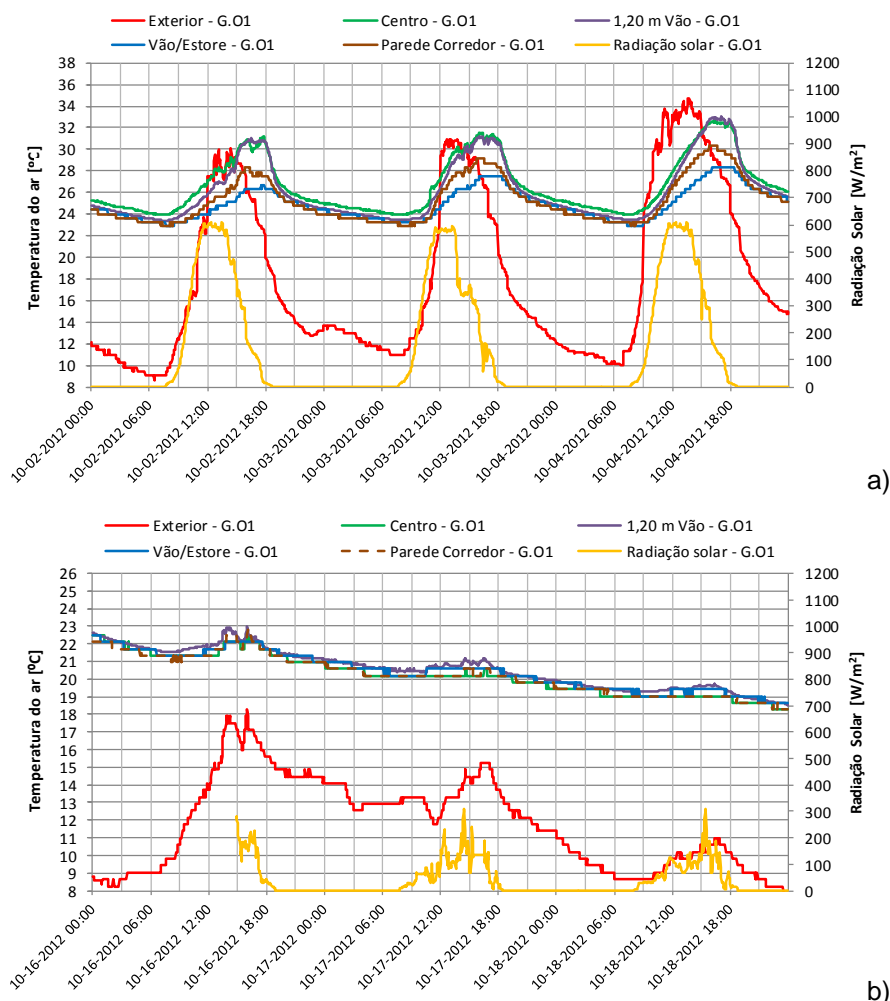


Fig.3.12. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (O1), no gabinete: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

As figuras 3.13 a 3.15 mostram os resultados obtidos na monitorização da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Inverno (I1) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da temperatura exterior e da radiação solar global em superfície horizontal.

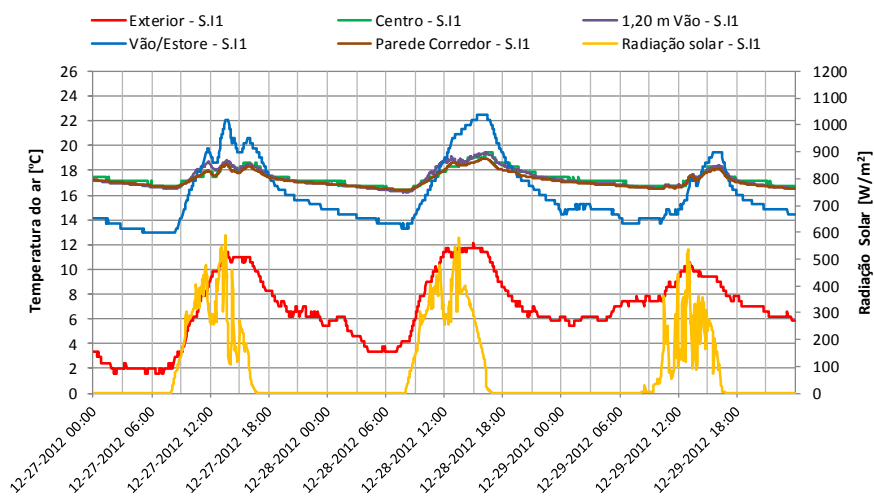


Fig.3.13. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), na sala de aulas para Céu limpo

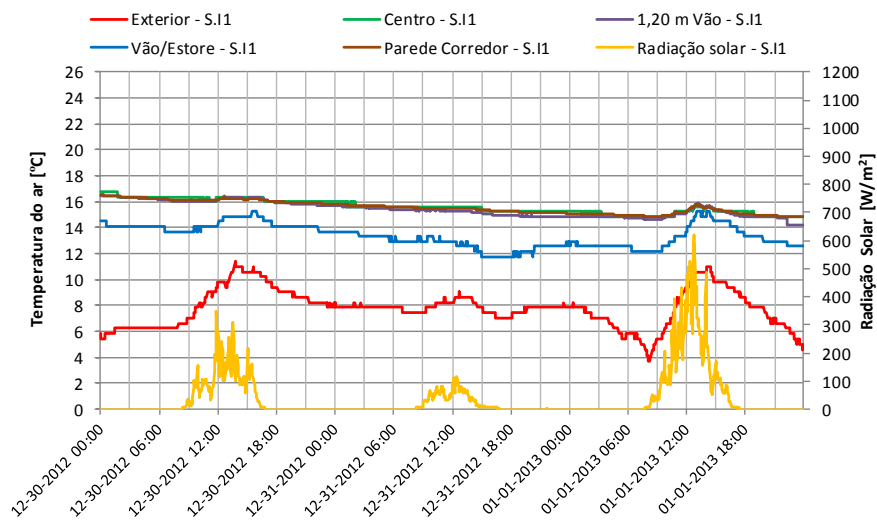


Fig.3.14. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), na sala de aulas para Céu encoberto

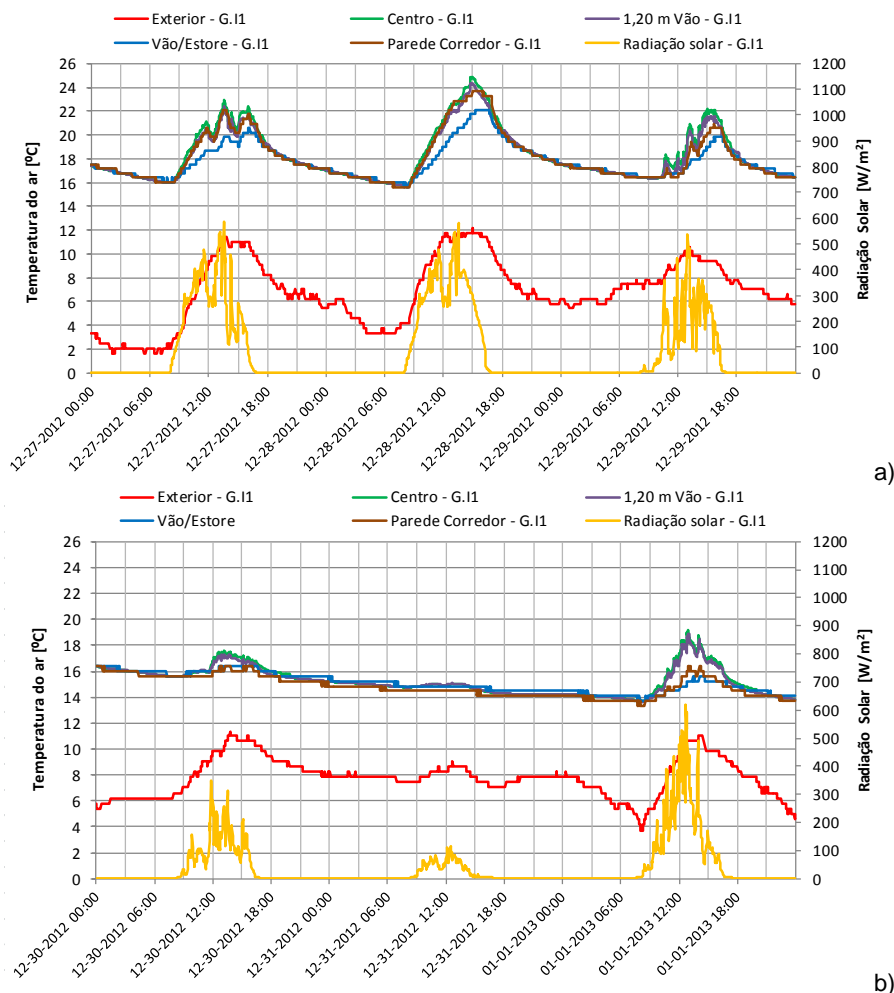


Fig.3.15. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (I1), no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto

As figuras 3.16 a 3.18 mostram os resultados obtidos na monitorização da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Primavera (P1) para céu limpo

e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da temperatura exterior e da radiação solar global em superfície horizontal.

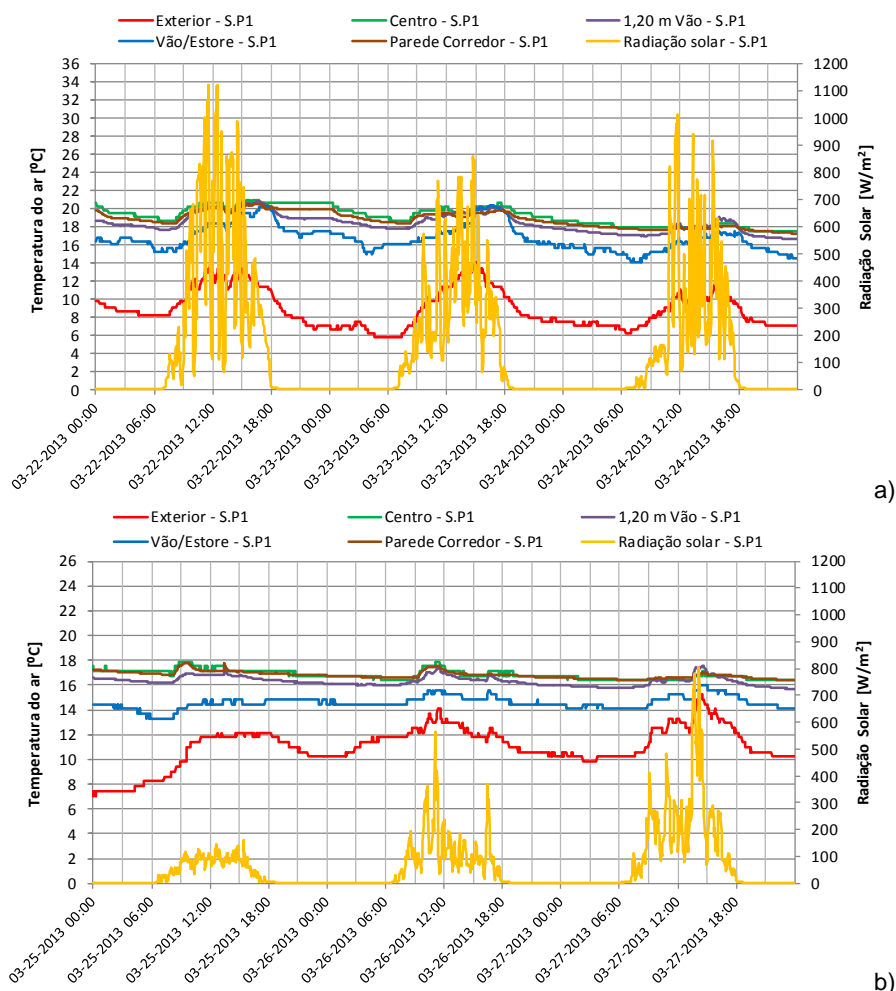


Fig.3.16. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), na sala de aulas: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

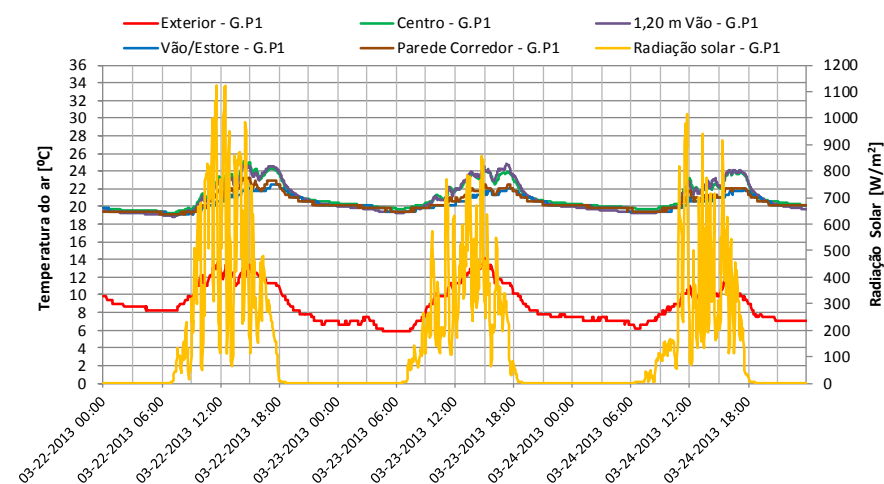


Fig.3.17. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), no gabinete para Céu limpo

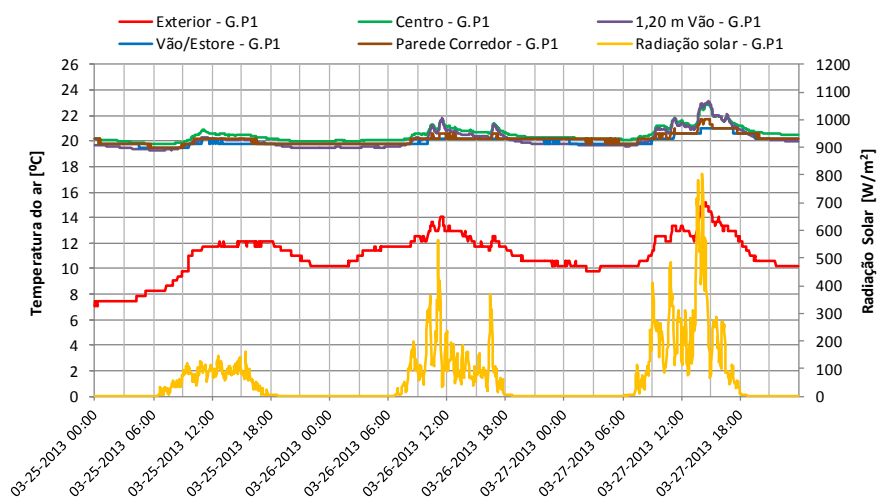


Fig.3.18. – Variação da temperatura do ar para a situação com os vãos com o estore a 0% (P1), no gabinete para Céu encoberto

No geral, podemos observar que a temperatura do ar tem maior variação no gabinete. Em ambos os casos o valor mais elevado da temperatura do ar regista-se a 1,20 m do vão envidraçado. Nos dias de céu encoberto, a temperatura de ar tem menor variação e os valores são muito semelhantes nos dois espaços, sendo o valor mais baixo registado junto ao vidro. Em ambos os espaços podemos observar que existe um desfaseamento entre os valores máximos registados para a temperatura interior e para a temperatura exterior, sendo o amortecimento maior na sala de aulas. Nos dias de céu encoberto não é visível o desfaseamento entre os valores máximos registados para a temperatura interior e para a temperatura exterior.

No verão, como podemos observar, na sala de aulas a temperatura do ar tem menor variação entre os valores máximos e mínimos, cerca de 2 °C, enquanto no gabinete a variação é aproximadamente de 5 °C, sendo os valores registados para a temperatura do ar interior sempre superiores aos registados para a temperatura exterior.

No outono, como podemos observar, nos dias de céu limpo, na sala de aulas a temperatura do ar tem menor variação entre os valores máximos e mínimos, cerca de 5 °C, enquanto no gabinete a variação é aproximadamente de 13 °C a 1,20 m do vão envidraçado.

No inverno, como podemos observar, nos dias de céu limpo, na sala de aulas a temperatura do ar junto ao vidro tem maior variação entre os valores máximos e mínimos, apresentando entre as 10:00 e as 17:00 horas valores mais elevados em relação às restantes temperaturas do ar. No gabinete a temperatura do ar mais elevada verifica-se no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, os valores registados para a temperatura do ar na parede do corredor e junto ao vidro são muito semelhantes.

Na Primavera, como podemos observar, nos dias de céu limpo, na sala de aulas a temperatura do ar tem maior variação entre os valores máximos e mínimos, a temperatura mais baixa verifica-se junto ao vidro, no gabinete a temperatura do ar regista valores mais elevados a 1,20 m do vão envidraçado podemos observar que a temperatura do ar junto ao vidro acompanha a variação da temperatura do ar registada na parede do corredor.

Na colocação dos equipamentos de medição teve-se o cuidado de os proteger da incidência direta da radiação solar. A relação entre a incidência direta da radiação solar e os equipamentos de monitorização, não será certamente igual à relação entre o corpo Humano e a incidência direta da radiação solar, mas certamente que este estará em desconforto.

Nos quadros 3.6 e 3.7 apresenta-se a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar na sala e no gabinete, para a situação de Céu limpo e Céu encoberto.

Quadro 3.6 - Análise estatística do registo da temperatura do ar registada no 1.º Ano

			Sala de Aulas (S)			Gabinete (G)		
Campanha		Radiação Solar	Temperatura do ar [°C]					
		[W/m <sup>2</sup> ]	Exterior	Centro	1,20 m Vão	Centro	1,20 m Vão	
V1	R	média	20,95	26,86	27,24	28,78	29,37	
		máximo	975	29,90	27,52	28,00	31,12	32,09
		mínimo		13,70	26,34	26,60	27,12	27,72
		desvio padrão		4,50	0,36	0,33	1,26	1,28
O1	R	média		18,10	22,60	21,84	25,83	26,01
		máximo	610	34,74	24,40	25,39	31,78	31,80
		mínimo		8,63	21,71	20,08/	23,08	23,36
		desvio padrão		7,70	0,58	1,14	2,54	2,47
	I	média		11,75	20,80	20,41	20,25	20,60
		máximo	309	18,28	22,09	21,92	22,48	22,99
		mínimo		7,83	19,42	19,13	18,28	18,54
		desvio padrão		2,28	0,71	0,67	1,11	1,10

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

Quadro 3.7 - Análise estatística do registo da temperatura do ar registada no 2.º Ano

			Sala de Aulas (S)		Gabinete (G)			
Campanha		Radiação Solar	Temperatura do ar [°C]					
		[W/m <sup>2</sup> ]	Exterior	Centro	1,20 m Vão	Centro	1,20 m Vão	
I1	R	média	6,84	17,40	17,32	18,32	18,15	
		máximo	608	12,16	19,42	19,50	24,85	24,30
		mínimo		1,60	16,38	16,20	15,72	15,72
		desvio padrão		2,71	0,67	0,77	2,17	1,97
	I	média		7,76	15,61	15,40	15,25	15,19
		máximo	621	11,38	16,76	16,50	19,15	18,90
		mínimo		3,74	14,85	14,15	13,69	13,67
		desv.padrão		1,45	0,56	0,58	1,07	1,01
P1	R	média	8,90	19,47	18,55	20,98	20,77	
		máximo	1122	14,09	20,95	20,82	25,07	24,80
		mínimo		5,81	17,90	16,96	19,27	18,87
		desvio padrão		2,17	0,88	1,00	1,51	1,70
	I	média		11,03	16,84	16,31	20,48	20,08
		máximo	804	15,23	17,90	17,51	22,97	23,12
		mínimo		7,03	16,38	15,70	19,75	19,25
		desvio padrão		1,59	0,38	0,37	0,57	0,71

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

Em relação à Campanha de Verão, durante o período em análise, no gabinete os valores registados para a temperatura do ar, em qualquer dos pontos de medição, são sempre superiores às registadas no exterior, variando entre 27,72 °C e 32,09 °C, respetivamente, o valor mínimo e valor máximo, registados a 1,20 m do vão envidraçado, o que indicia que os ocupantes do gabinete não terão condições mínimas de conforto térmico, mesmo recorrendo a medidas que permitam à sua adaptação, nomeadamente, a utilização de estores, a aberturas de janelas, a utilização de ventoinhas para fazer a

circulação do ar interior. No gabinete os valores da temperatura do ar (máximos, médios e mínimos) registados a 1,20 m do vão são ligeiramente superiores aos valores registados no centro.

Ao observar os resultados obtidos para a sala de aulas podemos concluir que esta apresenta melhores condições de conforto térmico, variando a temperatura do ar entre 26,60 °C e 28,00 °C, respetivamente, o valor mínimo e valor máximo registados a 1,20 m do vão envidraçado, podendo resultar, da existência de elementos de sombreamento, da percentagem de envidraçados, da profundidade da sala e da existência de uma grelha de ventilação na porta em contato com o corredor. Para a sala de aulas o valor da temperatura média do ar registado a 1,20 m do vão envidraçado (27,24 °C) é superior ao valor registado no centro (26,84 °C).

Em relação à Campanha de Outono, durante o período em análise, os valores registados evidenciam que os utilizadores do gabinete na maioria dos dias de outono encontram condições adequadas de conforto térmico, sendo o valor mínimo para a temperatura do ar registado a 1,20 m do vão de 18,28 °C nos dias com radiação solar irregular. Ao analisar os valores máximos da temperatura do ar tanto o gabinete como a sala garantem as condições de conforto térmico definidas no REH [8] para a estação de aquecimento, sem aquecimento ambiente, mesmo nos dias de céu encoberto.

Para a sala de aulas o valor da temperatura média do ar registado a 1,20 m do vão é inferior ao valor registado no centro, como seria de esperar, o valor máximo da temperatura do ar é superior. No gabinete os valores da temperatura do ar (máximos, médios e mínimos) registados a 1,20 m do vão são superiores aos valores registados no centro.

Em relação à Campanha de Inverno, durante o período em análise, os valores registados evidenciam que o gabinete mesmo nos dias de inverno pode não garante aos seus utilizadores condições adequadas conforto térmico (por sobreaquecimento), sendo os valores máximos da temperatura do ar muito próximos dos 25 °C (24,85 °C), devendo-se à incidência da radiação solar, recomendados pelo REH [8] para garantir as condições de conforto na estação de arrefecimento, mas ao analisar os valores médios da temperatura do ar o gabinete garante as condições de conforto térmico definidas no REH [8] para a estação de aquecimento, sem aquecimento ambiente, nos dias de céu limpo.

Para a sala de aulas o valor da temperatura média do ar registado a 1,20 m do vão é inferior ao valor registado no centro, o valor máximo da temperatura do ar é ligeiramente superior, nos dias de céu limpo. Ao analisar os valores médios da temperatura do ar a sala de aulas garante as condições de conforto térmico definidas no REH [8] para a estação de aquecimento, sem aquecimento ambiente, nos dias de céu limpo.

Em relação à Campanha de Primavera, durante o período em análise, os valores registados evidenciam que os utilizadores do gabinete encontram condições adequadas de conforto térmico, sendo os valores mínimos da temperatura do ar superiores a 18 °C, garantindo as condições de conforto térmico definidas no REH [8] para a estação de aquecimento, sem aquecimento ambiente, mesmo nos dias com radiação solar irregular, céu encoberto. Mas nos dias de céu limpo, no gabinete os utilizadores podem não ter condições adequadas de conforto térmico, por sobreaquecimento, uma vez que os valores máximos da temperatura do ar são ligeiramente superiores aos 25 °C, de forma a garantir as condições de conforto térmico definidas no REH [8] para a estação de arrefecimento, devendo-se à incidência direta da radiação solar.

Para a sala de aulas os valores registados para a temperatura do ar (máximos, médios e mínimos) a 1,20 m do vão envidraçado são ligeiramente inferiores aos registados no centro, mas ambos são inferiores aos registados no gabinete, o que pode dever-se à existência do sombreamento horizontal.

Nas figuras que se seguem é apresentada a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar no interior de cada espaços medidos, ao centro e a 1,20 m do vão envidraçado, para todas as campanhas de medições caracterizadas nos quadros 3.4 e 3.5.

As figuras 3.19 e 3.20 apresentada a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar durante a Campanha de Verão (V) para céu limpo, na sala de aulas e no gabinete.

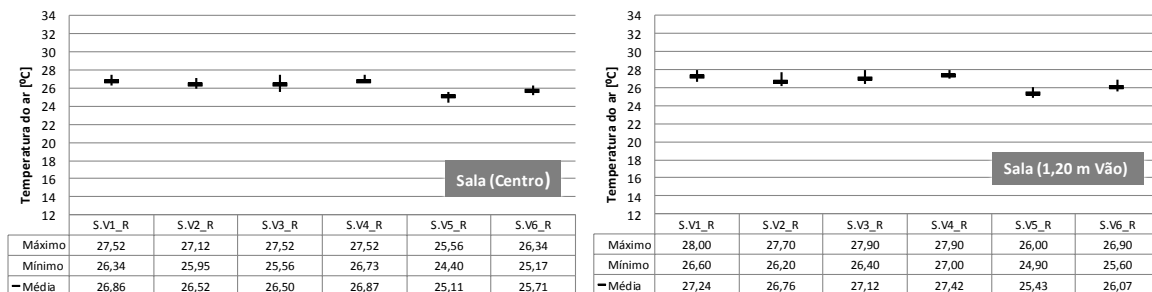


Fig.3.19. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Verão (V) para Céu limpo, à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão

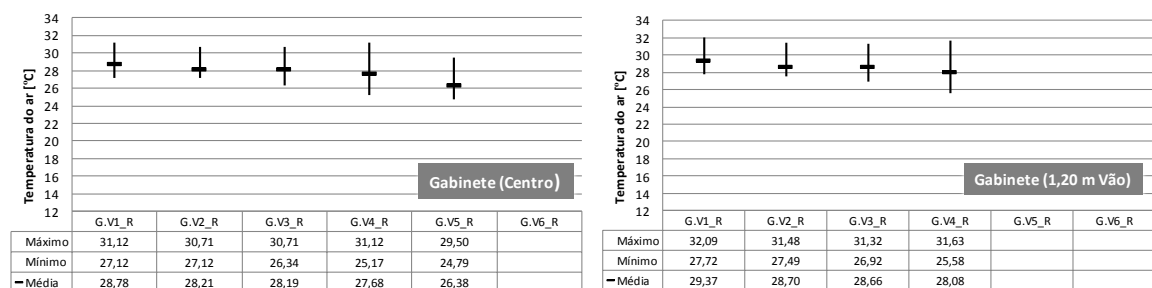


Fig.3.20. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Verão (V) para Céu limpo, à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão

As figuras 3.21 e 3.22 apresentada a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar durante a Campanha de Outono (O) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete.

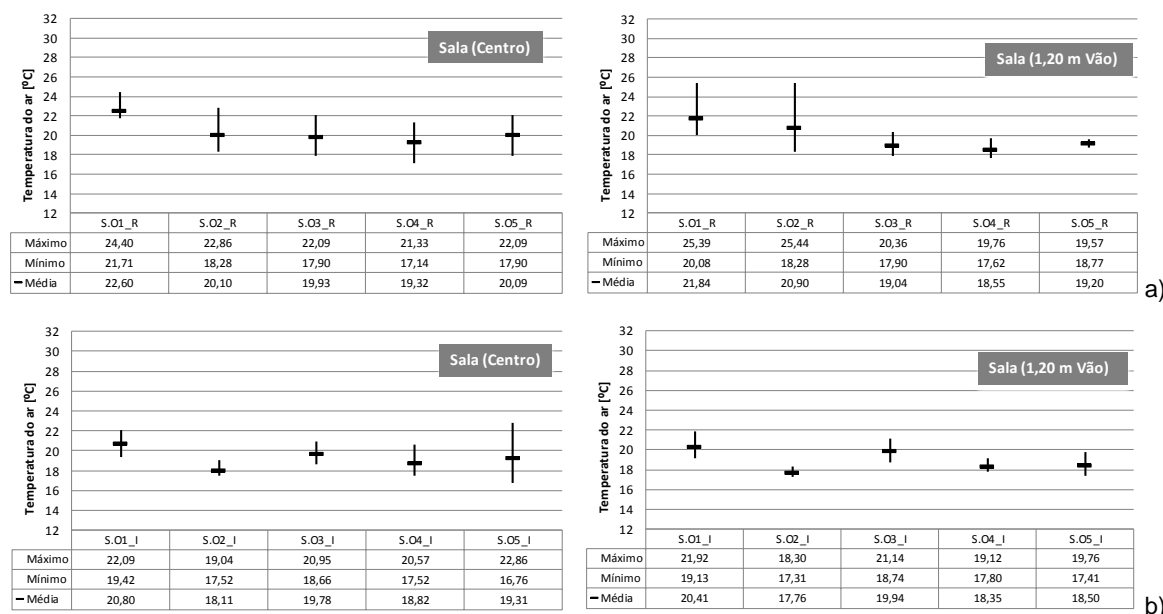


Fig.3.21. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Outono (O), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

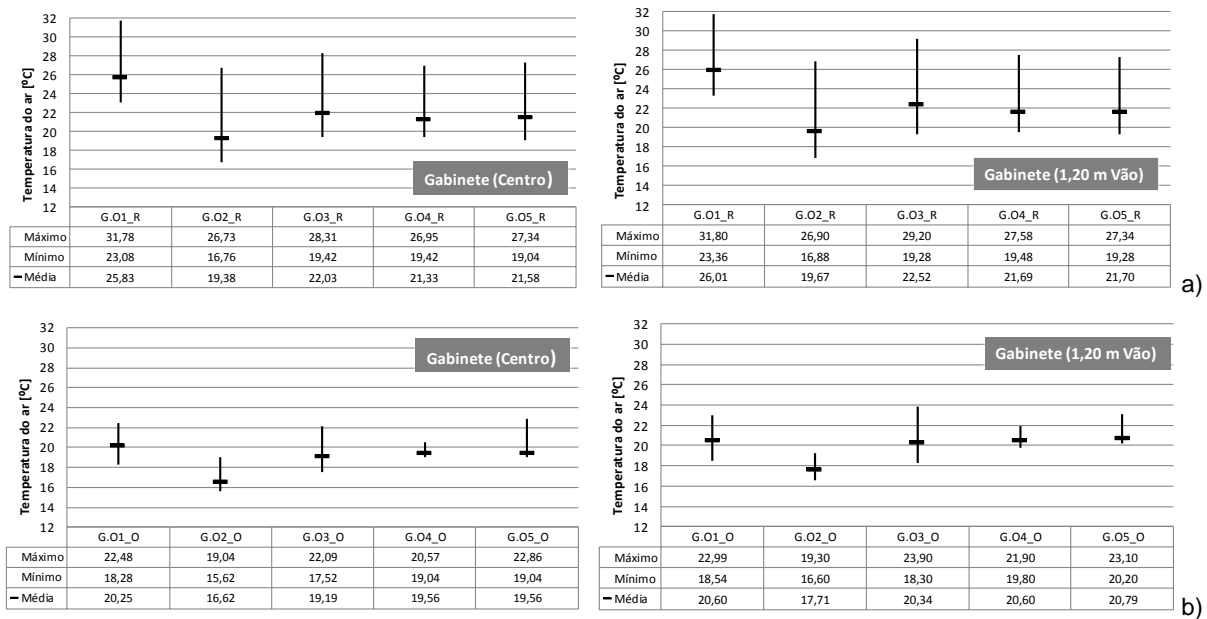


Fig.3.22. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Outono (O), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

As figuras 3.23 e 3.24 apresentada a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar durante a Campanha de Inverno (I) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete.

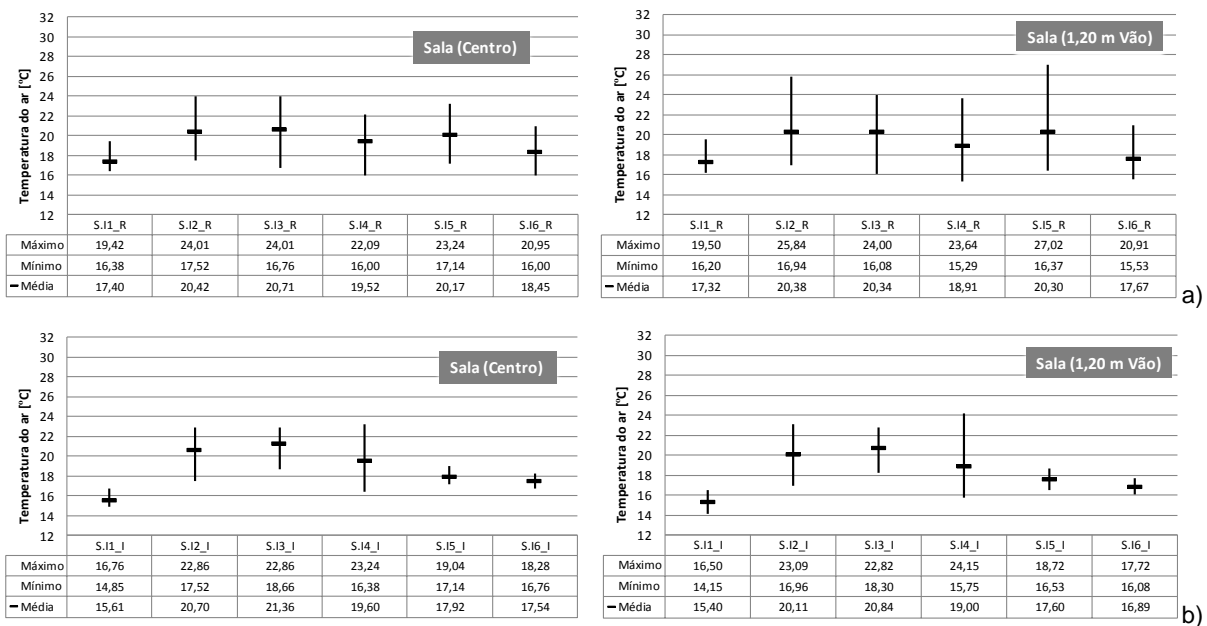


Fig.3.23. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Inverno (I), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto



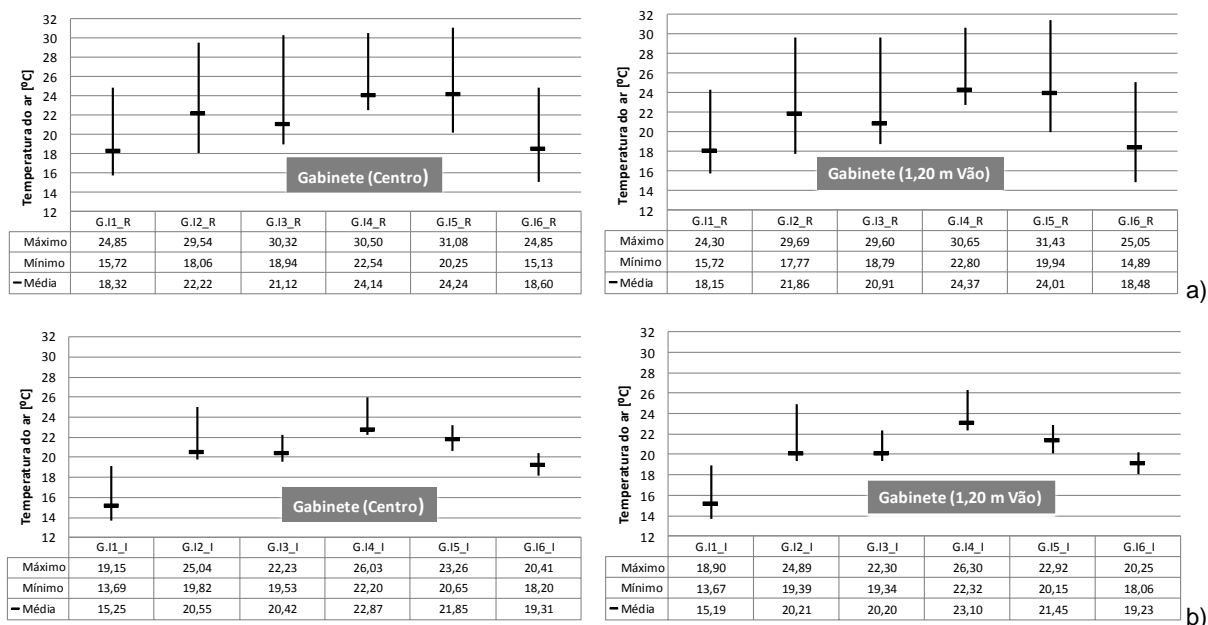


Fig.3.24. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Inverno (I), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

As figuras 3.25 e 3.26 apresentada a análise estatística dos resultados obtidos para a temperatura do ar durante a Campanha de Primavera (P) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete.

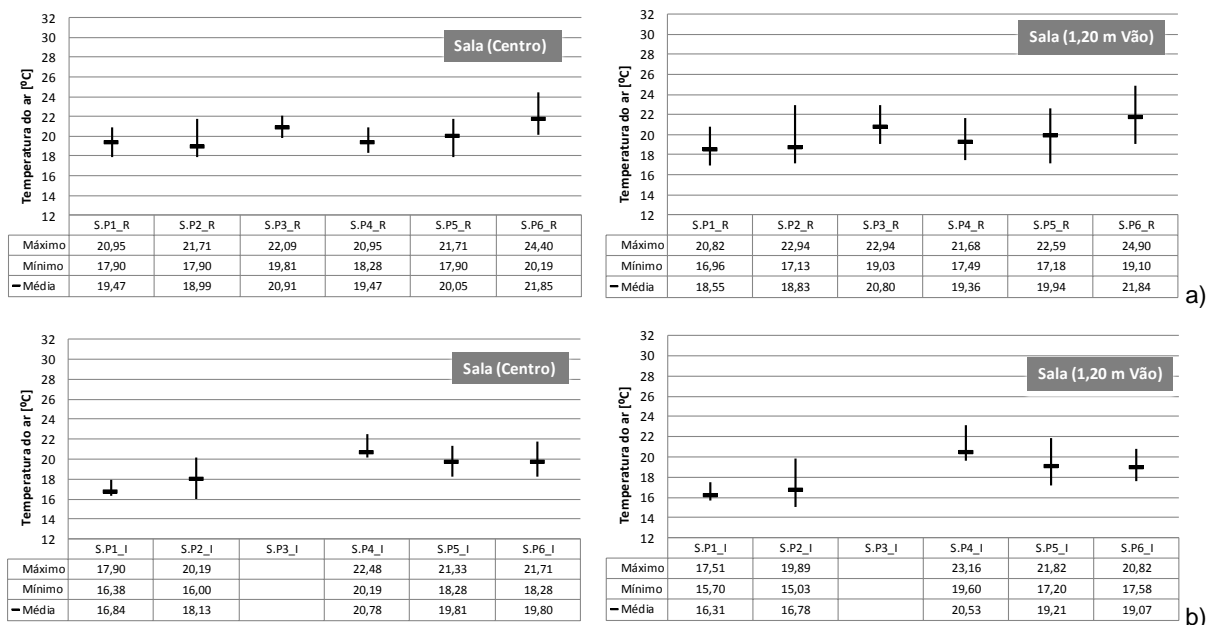


Fig.3.25. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Primavera (P), à esquerda no centro da sala de aulas e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

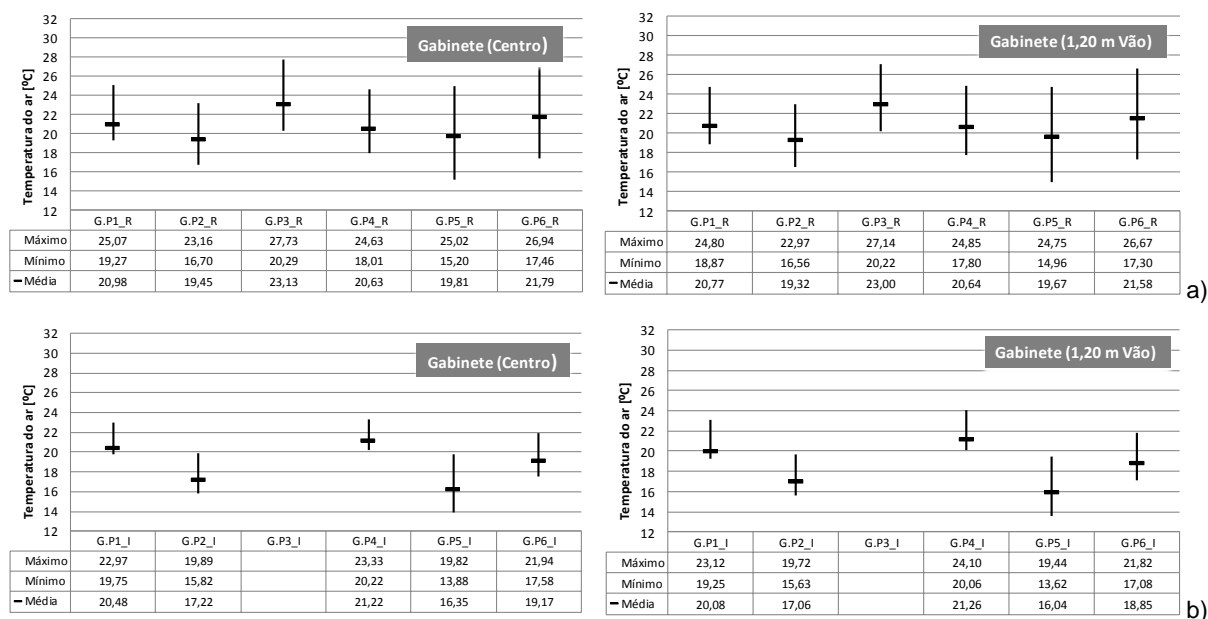


Fig.3.26. – Análise da variação da temperatura do ar durante a Campanha de Primavera (P), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

Nos períodos em não se apresentam os resultados não se obtiveram registros.

No geral, ao observar os resultados obtidos para a sala de aulas podemos concluir que apresenta melhores condições de conforto térmico, variação da temperatura do ar é menor. Nos dias de céu encoberto, a temperatura de ar tem menor variação e os valores são muito semelhantes nos dois espaços.

### 3.4.3. HUMIDADE RELATIVA

A análise da humidade relativa só terá interesse quando associada à produção de vapor (presença de ocupantes) e à ventilação. Assim, nas figuras seguintes serão apresentados os resultados obtidos na monitorização da humidade relativa quando uma das condições anteriores se verificou.

A figura 3.27 mostra os resultados obtidos na monitorização da humidade relativa interior para a condição de medição, Estore 100% ativado (0°) + 4/2 J (vãos com o estore 100% ativado a com as lâminas na posição horizontal e janela oscilo-batente com o modo basculante aberto), durante a Campanha de Verão (V4) para céu limpo, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da humidade relativa exterior e da velocidade do ar.

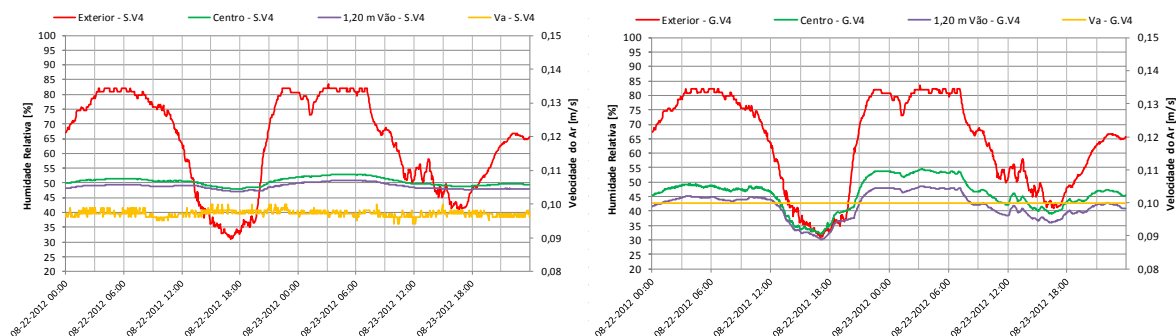


Fig.3.27. – Variação da humidade relativa para a situação com os vãos com o estore 100% ativado com as lâminas na posição horizontal e janela oscilo-batente com o modo basculante aberto (V4) para céu limpo, à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete

A figura 3.28 mostra os resultados obtidos na monitorização da humidade relativa interior para a situação com os vãos com o estore 0% ativado, durante a Campanha de Outono (O5) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas com ocupação e no gabinete sem ocupação. É ainda apresentada a variação da humidade relativa exterior e da velocidade do ar.

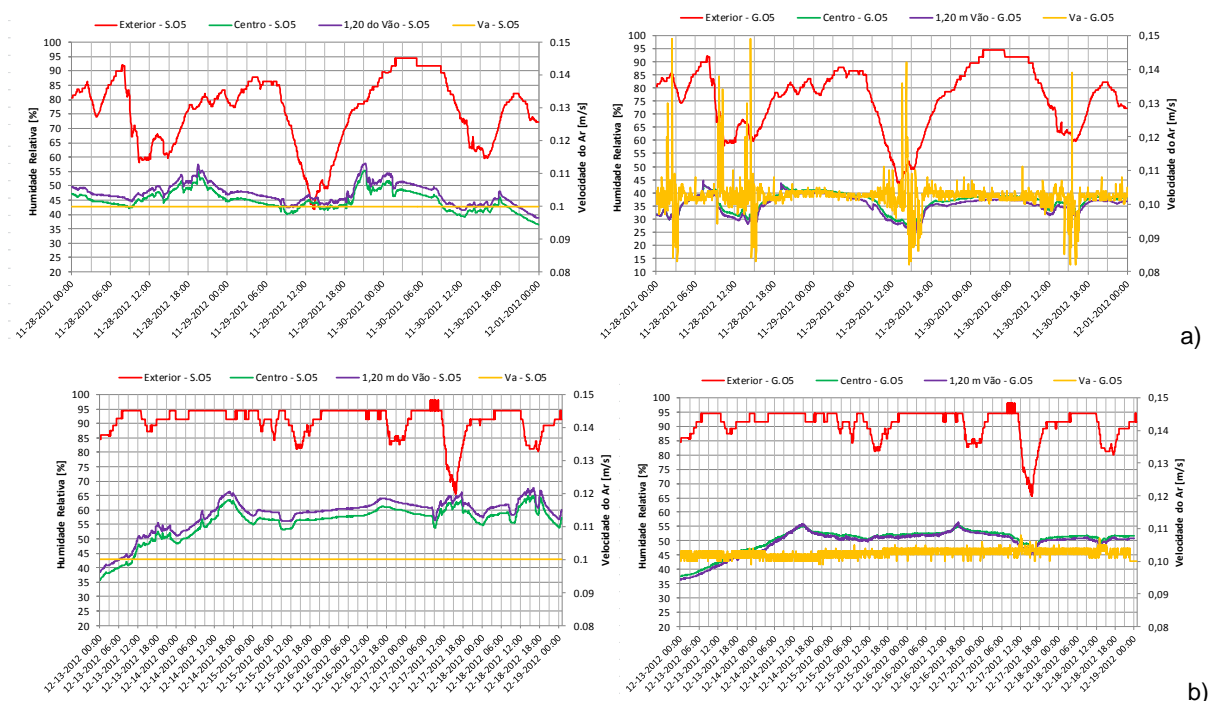


Fig.3.28. – Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (O5), à esquerda na sala de aulas com ocupação e à direita no gabinete sem ocupação. a) Céu limpo; b) Céu encoberto

A figura 3.29 mostra os resultados obtidos na monitorização da humidade relativa interior para a situação com os vãos com o estore 0% ativado com o aquecimento dos espaços ligado, durante a Campanha de Inverno (I2) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas com ocupação e no gabinete sem ocupação. É ainda apresentada a variação da humidade relativa exterior e da velocidade do ar.

A figura 3.30 mostra os resultados obtidos na monitorização para a humidade relativa interior para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto, durante a Campanha de Primavera (P5) para céu limpo e para céu encoberto, na sala de aulas e no gabinete. É ainda apresentada a variação da humidade relativa exterior e da velocidade do ar.

A monitorização da humidade relativa evidenciou que esta não se constitui como um problema quer na sala de aulas, quer no gabinete. Os valores observados são adequados e próximos das referências regulamentares. Durante os dias com céu encoberto a variação da humidade relativa é menor em ambos os espaços, o que permite concluir que a humidade relativa varia em função da variação da temperatura do ar, quando esta aumenta diminui a humidade relativa.

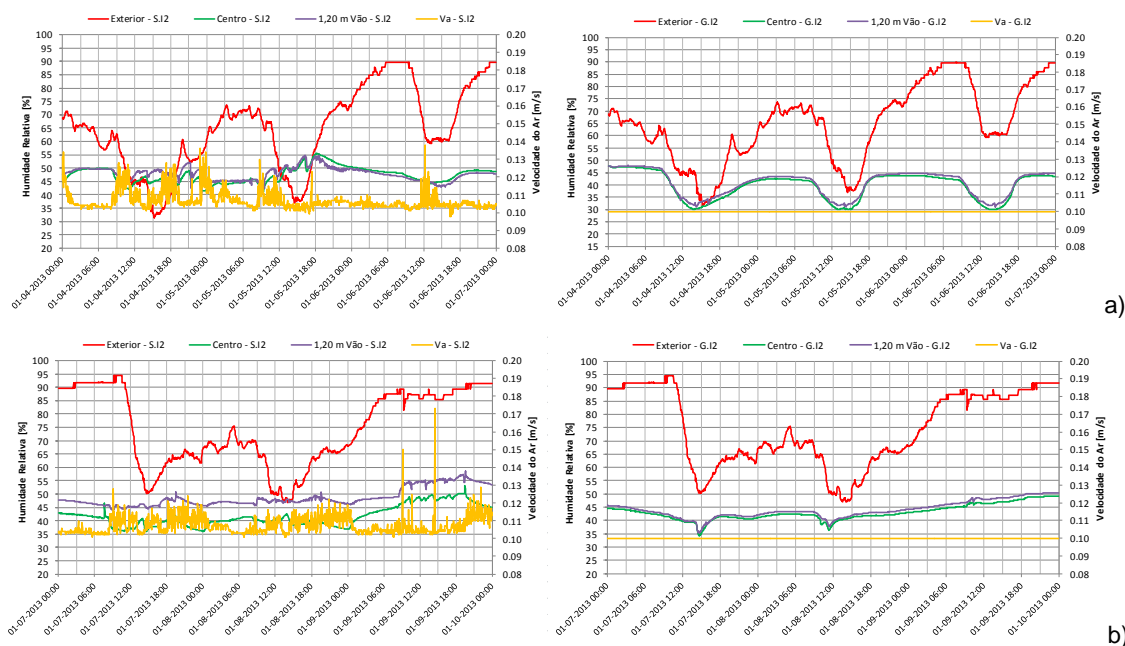


Fig.3.29. – Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com aquecimento (I2), à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto

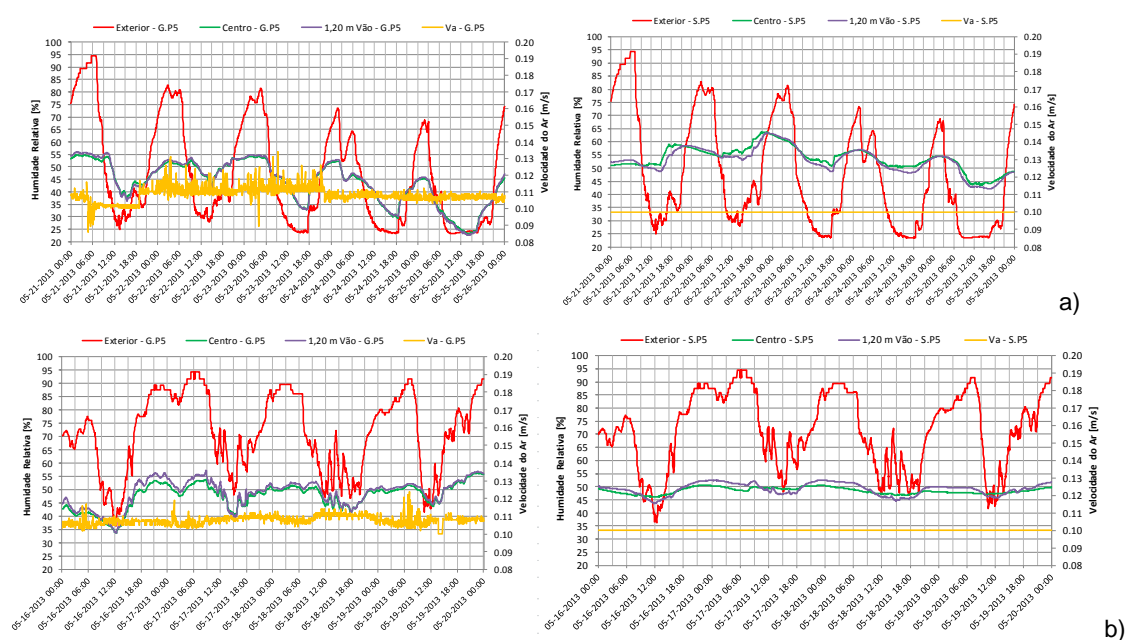


Fig.3.30. – Variação da humidade relativa do ar para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto (P5), à esquerda na sala de aulas e à direita no gabinete. a) Céu limpo; b) Céu encoberto

#### 3.4.4. TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE E TEMPERATURA OPERATIVA

Para determinar a temperatura operativa ( $T_{op}$ ) foi calculada a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) através de dois métodos: 1) a medição direta, o método mais comum é o da temperatura de globo, medida por um globo negro com um sensor de temperatura no seu centro, ligado ao Babuc ABC e colocado a 1,10 m de altura; 2) o cálculo, utilizando as temperaturas superficiais interiores da envolvente e do respetivo fator de forma em relação ao ocupante sentado ou de pé, respetivamente, a 0,60 m ou a

1,10 m de altura, para o centro do espaço e a 1,20 m do vão envidraçado, utilizando as equações referidas em §2.2.3.3 do capítulo 2.

A figura 3.31 mostra os resultados para a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e para temperatura operativa ( $T_{op}$ ), calculadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçado para a sala de aulas a 1,10 m de altura, e os valores medidos a 1,10 m de altura no gabinete a 1,20 m do vão envidraçado, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ) na sala de aulas, da temperatura exterior e da velocidade do ar ( $v_a$ ).

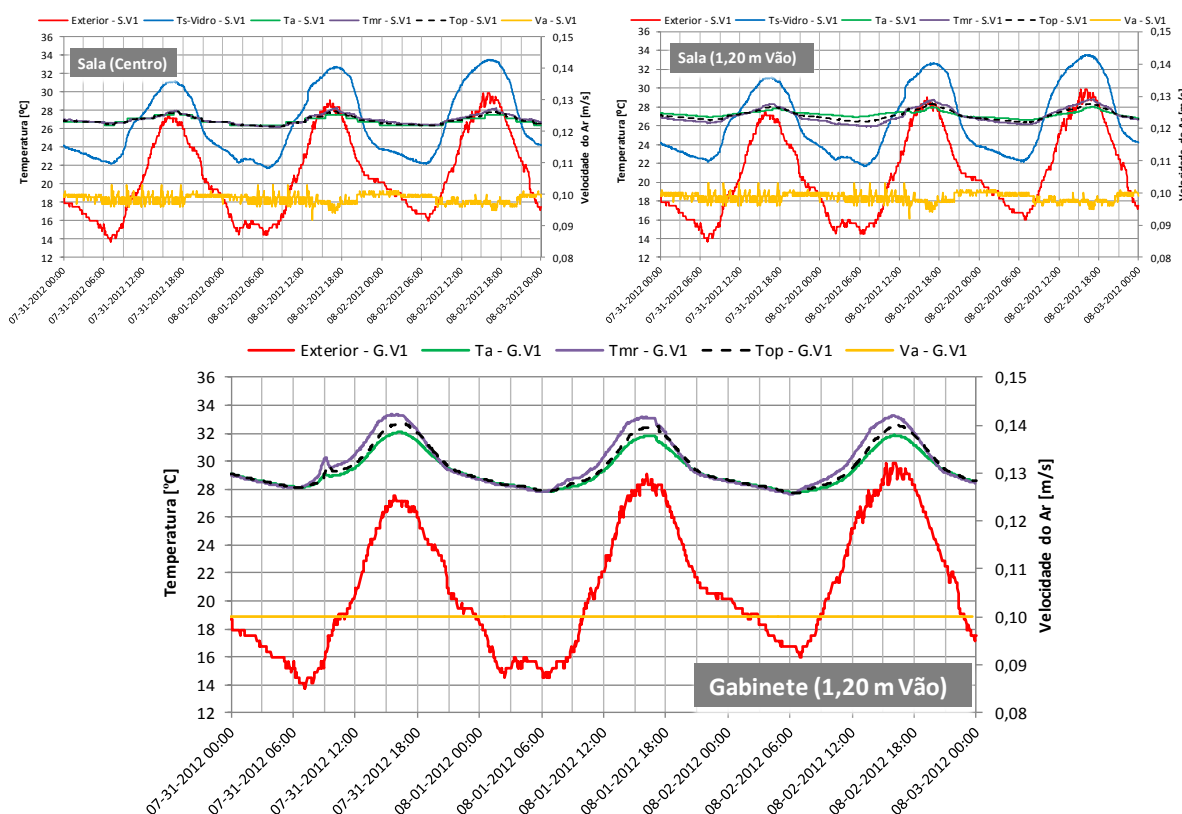
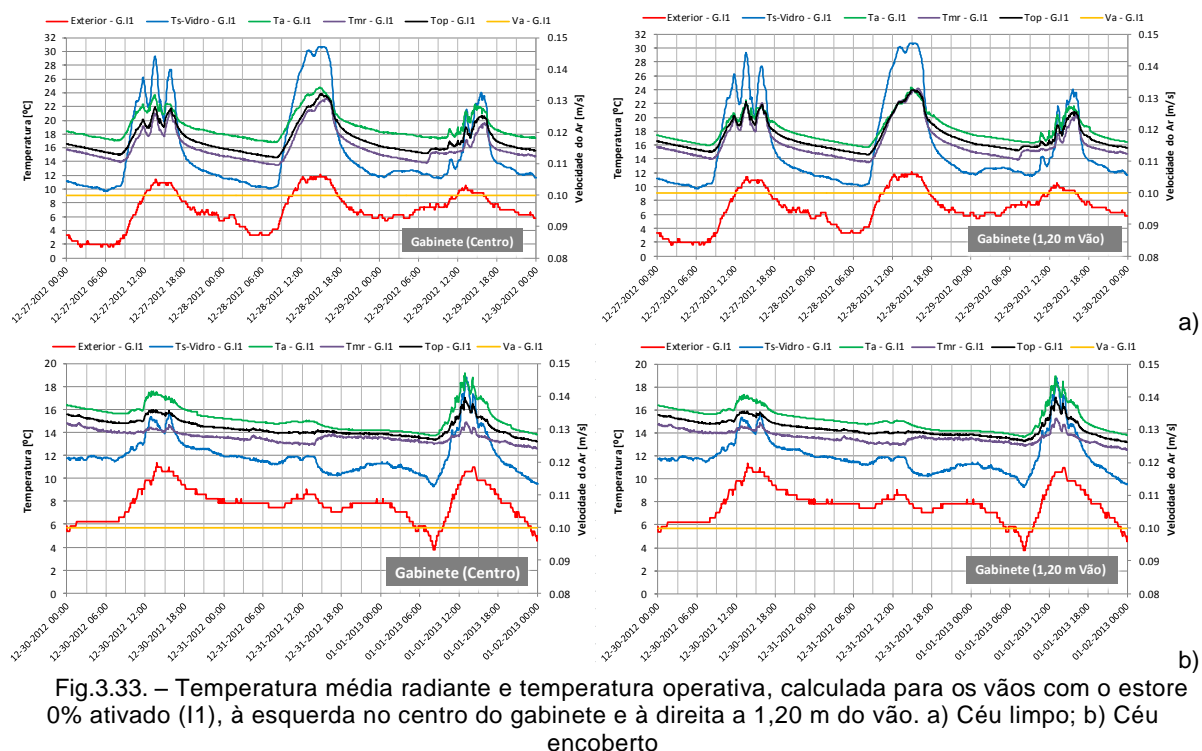
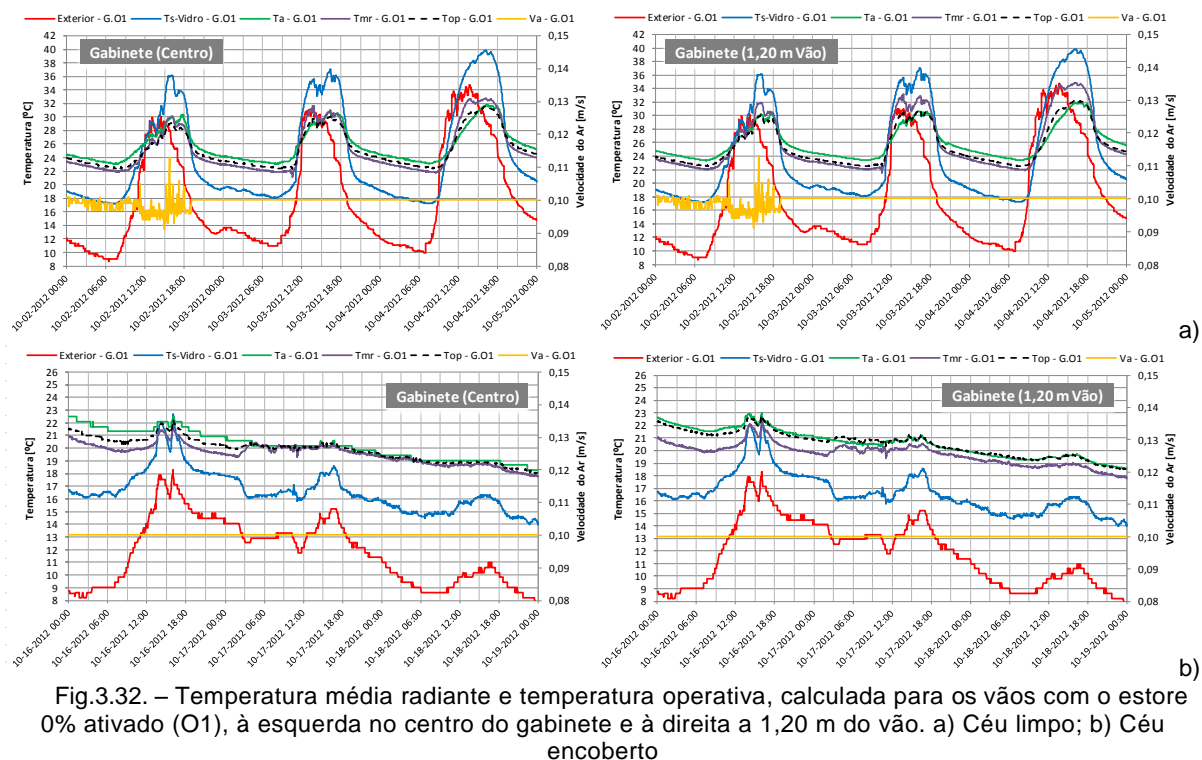


Fig.3.31. – Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculadas no centro da sala de aulas e a 1,20 m do vão e medidas a 1,20 m do vão no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (V1)

A figura 3.32 mostra os resultados para a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e para a temperatura operativa ( $T_{op}$ ) calculadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçado para o gabinete 1,10 m de altura, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Outono (O1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ), da temperatura exterior e da velocidade do ar ( $v_a$ ).

A figura 3.33 mostra os resultados para a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e para a temperatura operativa ( $T_{op}$ ) calculadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçado para o gabinete 1,10 m de altura, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Inverno (I1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ), da temperatura exterior e da velocidade do ar ( $v_a$ ).



A figura 3.34 mostra os resultados para a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e para a temperatura operativa ( $T_{op}$ ) calculadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçado para o gabinete 1,10 m de altura, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Primavera (P1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ), da temperatura exterior e da velocidade do ar ( $v_a$ ).



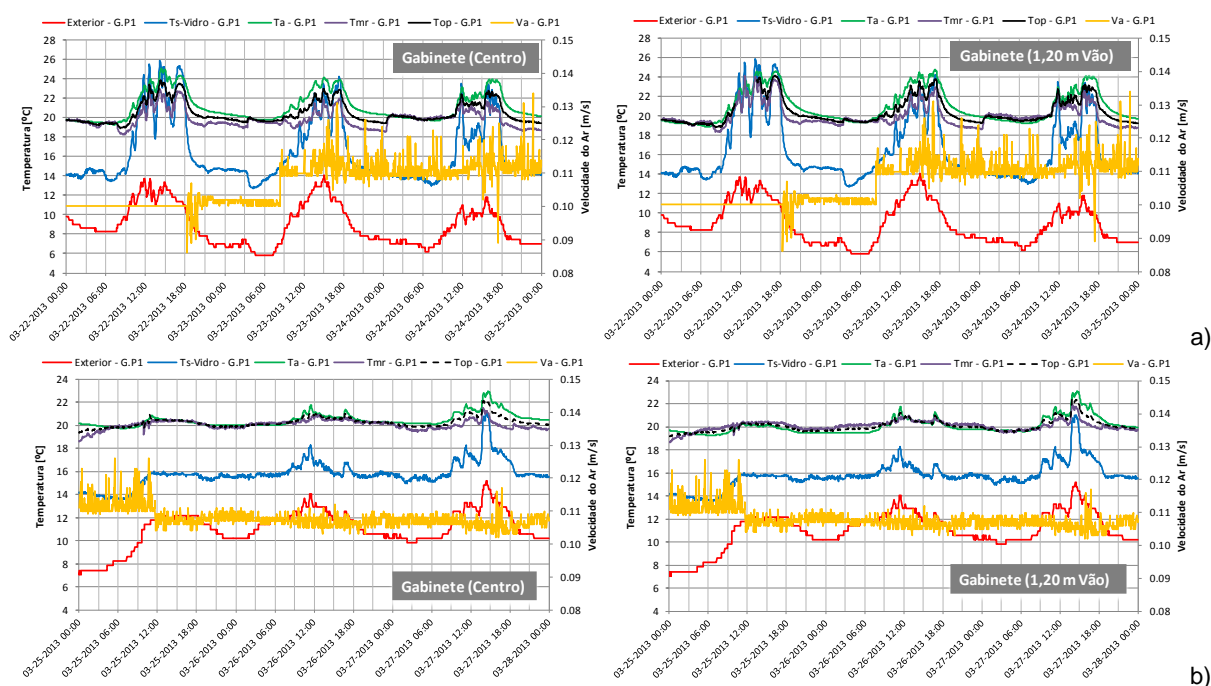


Fig.3.34. – Temperatura média radiante e temperatura operativa, calculada para os vãos com o estore 0% ativado (P1), à esquerda no centro do gabinete e à direita a 1,20 m do vão. a) Céu limpo; b) Céu encoberto

Para complementar esta avaliação apresenta-se nos quadros 3.8 e 3.9 uma análise estatística dos resultados obtidos na sala de aulas e no gabinete. Para cada espaço mostram-se os valores obtidos para cada uma das condições da envolvente.

Os valores obtidos para a temperatura média radiante e para a temperatura operativa no centro dos espaços em estudo e a 1,20 m do vão envidraçado são muito próximos dos valores obtidos para a temperatura do ar. Os valores obtidos para a temperatura operativa são influenciados pela incidência ou não da radiação solar e pela temperatura exterior, que se pode verificar na variação da temperatura superficial do vidro, sendo mais visível nos dias de céu limpo quando a radiação solar incide diretamente no vidro, principalmente quando o Sol está numa trajetória mais baixa.

Quadro 3.8 - Análise estatística da temperatura superficial no centro do vidro, da temperatura média radiante e da temperatura operativa registadas no 1.º Ano

		Sala de Aulas (S)							Gabinete (G)						
		Temperatura [°C]							Temperatura [°C]						
Campanha		$T_s$ (Vidro)	Centro		1,20 m Vão		$V_a$ [m/s]		$T_s$ (Vidro)	Centro		1,20 m Vão		$V_a$ [m/s]	
			$T_{op}$	$T_{mr}$	$T_{op}$	$T_{mr}$				$T_{op}$	$T_{mr}$	$T_{op}$	$T_{mr}$		
V1	R	média	26,59	26,92	26,99	27,16	27,08	0,099	-/-	-/-	-/-	29,60	29,82	0,10	
		máximo	33,50	27,93	28,23	28,44	28,87	1,103				32,74	33,38		
		mínimo	21,70	26,26	26,17	26,38	25,92	0,092				27,70	27,65		
		desvio padrão	3,75	0,45	0,50	0,54	0,79	0,001				1,51	1,75		
O1	R	média							24,23	25,19	25,11	25,47	25,76	0,10	
		máximo							39,90	31,54	32,77	32,28	34,90	0,11	
		mínimo	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	17,10	22,16	21,08	22,47	21,55	0,09	
		desvio padrão							0,35	2,67	3,35	2,92	3,97	0,001	
	I	média							16,64	19,92	19,58	20,54	19,74		
		máximo							22,70	22,28	21,71	22,85	22,42		
		mínimo	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	14,00	18,01	17,74	18,47	17,79	0,10	
		desvio padrão							0,57	0,91	0,78	1,02	0,87		

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

Quadro 3.9 - Análise estatística da temperatura superficial no centro do vidro, da temperatura média radiante e da temperatura operativa registadas no 2.º Ano

		Gabinete (G)					v <sub>a</sub> [m/s]	
		Temperatura [°C]						
Campanha		T <sub>s</sub> (Vidro)	Centro		1,20 m Vão			
			T <sub>op</sub>	T <sub>mr</sub>	T <sub>op</sub>	T <sub>mr</sub>		
I1	R	média	15,53	17,23	16,14	17,24	16,33	0,10
		máximo	30,70	23,76	23,20	23,96	24,17	
		mínimo	9,70	14,60	13,46	14,63	13,52	
		desvio padrão	5,88	2,18	2,23	2,21	2,49	
	I	média	11,98	14,42	13,60	14,41	13,62	0,10
		máximo	18,80	16,99	14,85	17,07	15,26	
		mínimo	9,30	13,20	12,56	13,18	12,53	
		desvio padrão	1,60	0,72	0,48	0,74	0,52	
P1	R	média	16,24	20,40	19,83	20,26	19,99	0,108
		máximo	25,90	23,85	23,13	24,14	24,15	0,131
		mínimo	12,70	18,92	18,23	18,81	18,33	0,086
		desvio padrão	3,31	1,13	0,90	1,28	1,16	0,006
	I	média	15,79	20,28	20,07	20,09	20,10	0,108
		máximo	21,00	22,15	21,57	22,44	21,96	0,126
		mínimo	13,60	19,39	18,63	19,18	18,68	0,102
		desvio padrão	1,13	0,42	0,39	0,52	0,43	0,003

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

Quando na sala de aulas, durante os períodos em análise para as campanhas de outono, inverno e primavera, não foram efetuados registos que nos permitam obter a temperatura operativa, por essa razão, nesses casos, na análise do conforto térmico considerou-se o valor da temperatura do ar registado. Nas figuras 3.35 e 3.36 é representada a correlação linear de Pearson (R) entre a temperatura do ar e a temperatura operativa no centro dos espaços e a 1,20 m do vão envidraçado, respetivamente, para a campanha de verão e para a campanha de inverno.

Nas figuras podemos concluir que a relação matemática e respetivo coeficiente de correlação linear de Pearson vêm demonstrar a forte dependência linear entre a temperatura do ar e a temperatura operativa, confirmado que para este tipo de espaços, a temperatura do ar pode ser utilizada como uma boa aproximação à temperatura operativa. À mesma conclusão já tinha chegado Matias [4] na investigação que desenvolveu, em que foi realizado um conjunto significativo de estudos de campo em edifícios de serviços (ensino e escritórios) e edifícios residenciais (convencionais e lares de idosos), para avaliação das condições de conforto, mas comparando valores médios.

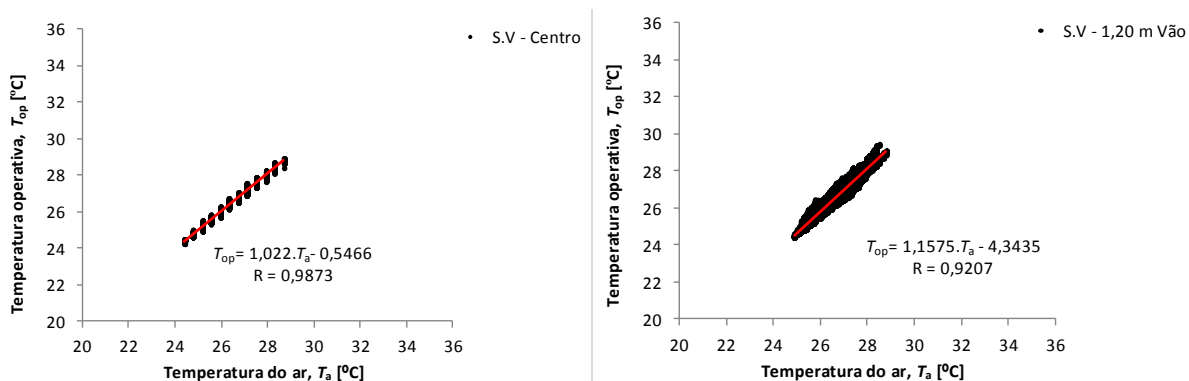


Fig.3.35. – Correlação entre a temperatura do ar e a temperatura operativa na sala de aulas, no centro e a 1,20 m do vão durante a campanha de verão



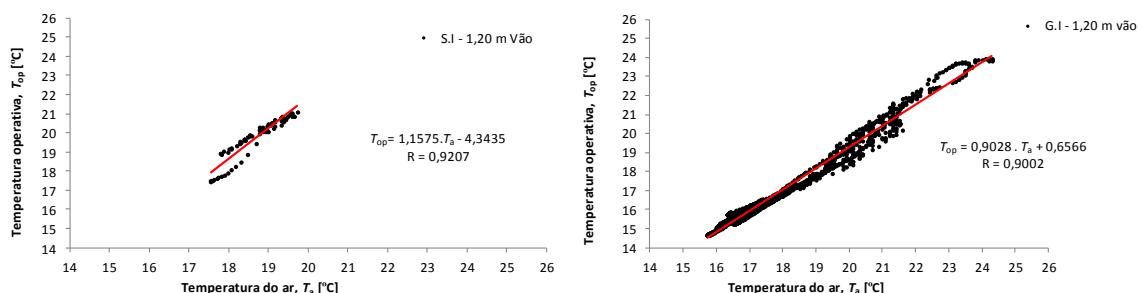


Fig.3.36. – Correlação entre a temperatura do ar e a temperatura operativa a 1,20 m do vão durante a campanha de inverno

### 3.4.5. CARATERIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO

A caraterização do tipo de ventilação é importante porque vai influenciar as trocas por renovação do ar, logo, as condições conforto no interior dos espaços.

Os edifícios não têm dispositivos de admissão de ar nas fachadas, no edifício pedagógico existem grelhas de ventilação entre o corredor e as salas de aula e os gabinetes. No edifício pedagógico, onde se encontra a sala de aulas possui um sistema de ventilação mecânico, que consiste na insuflação de ar dos corredores nas salas de aulas, não foi utilizado durante a campanha de medições. Assim, as medições foram efetuadas tendo em consideração que os edifícios têm ventilação natural e a única ventilação existente deve-se às infiltrações.

A ventilação foi monitorizada durante a campanha de inverno através do decaimento do gás traçador [17] [30]. As medições foram realizadas para as condições indicadas no quadro 3.10.

Quadro 3.10. - Condições de medição para a ventilação

Sala de Aulas (S)		Gabinete (G)	
Condições de Medição		Condições de Medição	
S.1	Porta e janelas fechadas	G.1	Porta e Janelas fechadas
S.2	Porta fechada e 4 janelas abertas (3 janelas a SW e 1 a janela a NW)	G.2	Porta fechada e 2 janelas abertas a SW
S.3	Porta fechada e 3 janelas abertas a SW	G.3	Porta fechada e 1 janela aberta a SW
S.4	Porta fechada e 1 janela aberta a SW	G.4	Porta aberta e janelas fechadas
S.5	Porta aberta e janelas fechadas	-	-

Janela aberta) Janela oscilo-batente com o modo basculante aberto

A figura 3.37 ilustra os resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para as condições de medição para a sala de aulas. A figura 3.38 ilustra os resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para as condições de medição para o gabinete.

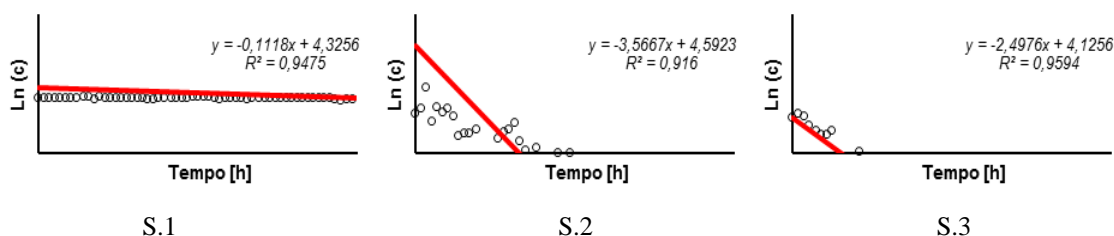


Fig.3.37. – Resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para a sala de aulas

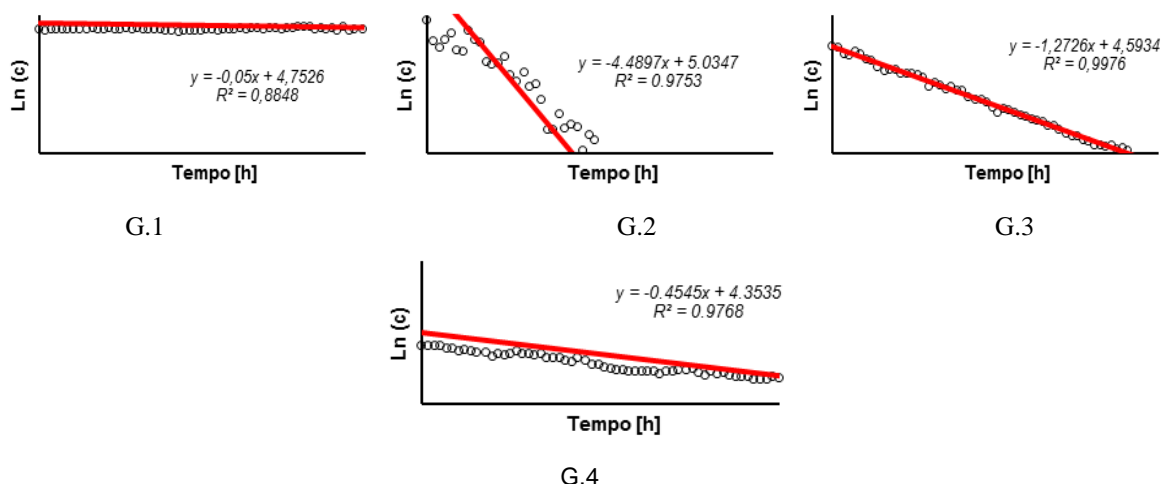


Fig.3.38. – Resultados obtidos para o decaimento do gás traçador para o gabinete

O quadro 3.11 mostra os valores dos caudais de ventilação e as respectivas renovações horárias.

Quadro 3.11. - Caudais de ventilação

	Sala de Aulas (S)			Gabinete (G)	
	RPH [h <sup>-1</sup> ]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]		RPH [h <sup>-1</sup> ]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]
S.1	0,11	21,6	G.1	0,05	3,6
S.2	3,57	700,1	G.2	4,49	319,4
S.3	2,49	488,3	G.3	1,64	90,04
S.4	1,64	321,6	G.4	0,45	32,0
S.5	0,65	127,5	-	-	-

Verificou-se que nas situações (S.1 e G.1) as renovações horárias foram muito baixas, mas com a abertura das janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto, situações S.2 e G.2, as renovações horárias são muito superiores.

#### 3.4.6. ASSIMETRIA DA TEMPERATURA RADIANTE

Para determinar a assimetria da temperatura radiante (RTA) com base na medição da temperatura superficial de duas superfícies opostas e do respetivo fator foram utilizados dois métodos: 1) a medição direta, com uma sonda que é constituída por duas faces planas idênticas e mede a temperatura radiante de cada uma das faces, a diferença entre os respetivos valores dá-nos o valor da assimetria da temperatura radiante, ligada ao Babuc ABC; 2) o cálculo, utilizando as temperaturas superficiais interiores do centro do vidro e da parede do corredor e do respetivo fator de forma em relação a um pequeno elemento plano localizado a 1,10 m de altura, 1,20 m do vão envidraçado, utilizando as equações referidas no ponto 2.2.3.3 do capítulo 2. Para este cálculo não foi considerado o efeito na radiação solar, nesse caso seria necessário definir a zona do comportamento que seria afetada pela incidência da radiação solar e a hora em tal poderia ocorrer.

A figura 3.39 mostra os resultados para a assimetria da temperatura radiante (RTA) para a situação com os vãos envidraçados com o estore 0% ativado, a 1,20 m do vão envidraçado, durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo. Para a determinação da assimetria da temperatura radiante (RTA) para o gabinete utilizou-se a medição direta e para a sala de aulas o método do cálculo, por esse motivo a figura apresenta os valores medidos, para esse efeito. É ainda apresentada a variação da

temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ) e na parede do corredor ( $T_{s-Parede Corredor}$ ), temperatura exterior e da radiação solar.

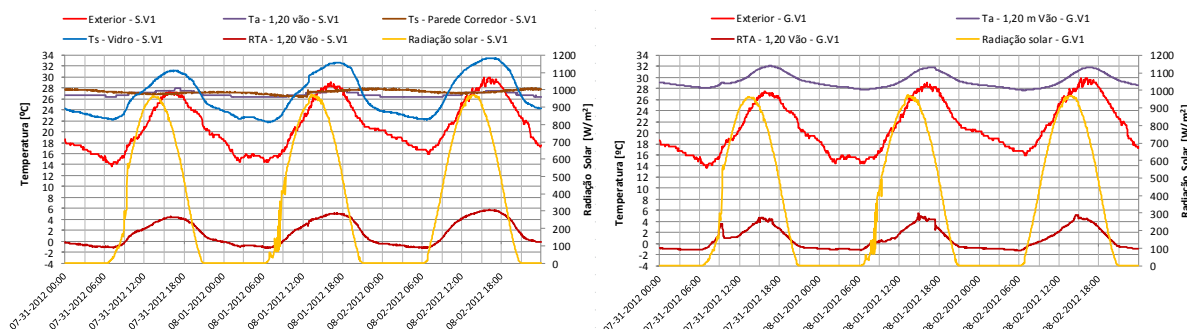


Fig.3.39. – Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (V1) no centro e a 1,20 m do vão, à esquerda calculada para a sala e à esquerda medida no gabinete

A figura 3.40 mostra os resultados para a assimetria da temperatura radiante ( $RTA$ ), no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado, a 1,20 m do vão envidraçado, durante a Campanha de Outono (O1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ) e na parede do corredor ( $T_{s-Parede Corredor}$ ), temperatura exterior e da radiação solar.

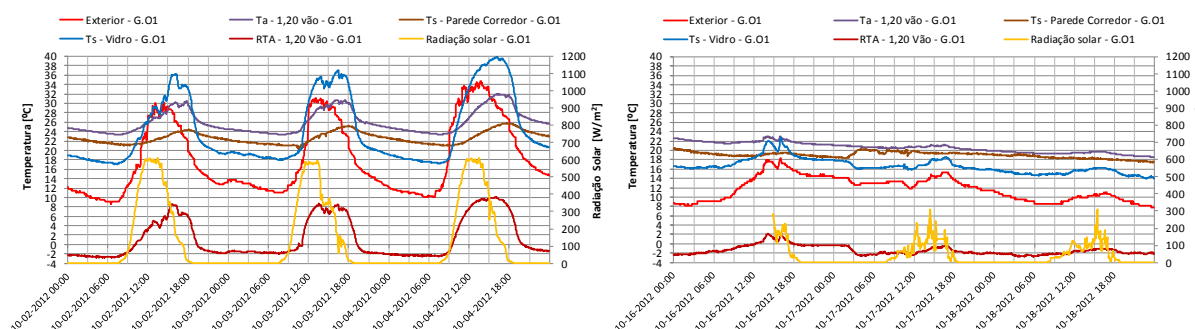


Fig.3.40. – Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (O1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto

A figura 3.41 mostra os resultados para a assimetria da temperatura radiante ( $RTA$ ), no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado, a 1,20 m do vão envidraçado, durante a Campanha de Inverno (I1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ) e na parede do corredor ( $T_{s-Parede Corredor}$ ), temperatura exterior e da radiação solar.

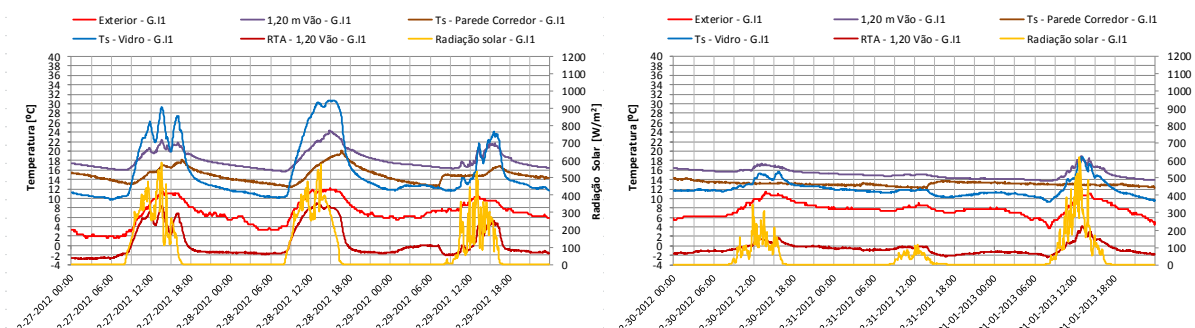


Fig.3.41. – Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (I1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto

Como podemos observar na figura 3.42, no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e aquecimento ligado, a 1,20 m do vão envidraçado, durante a Campanha de Inverno (I2) para céu limpo e para céu encoberto, no inverno, a assimetria da temperatura radiante ( $RTA$ ) tem mais relevância quando os espaços são climatizados.

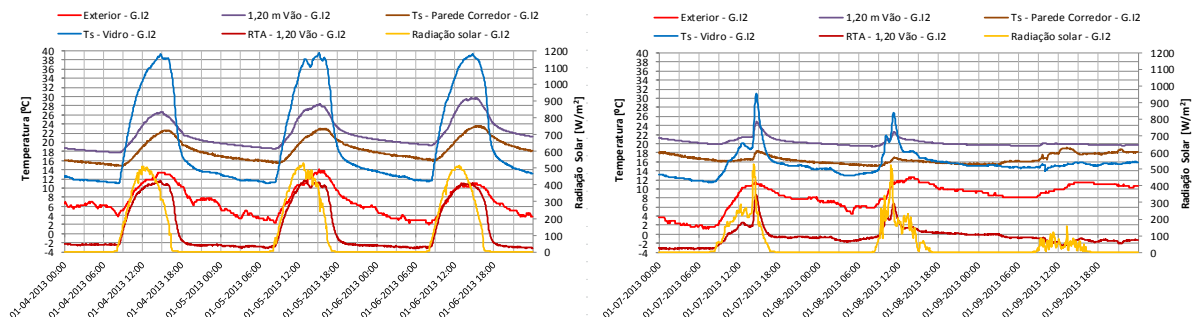


Fig.3.42. – Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado e com aquecimento (I2) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto

A figura 3.43 mostra os resultados para a assimetria da temperatura radiante ( $RTA$ ), no gabinete, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado, a 1,20 m do vão envidraçado, durante a Campanha de Primavera (P1) para céu limpo e para céu encoberto. É ainda apresentada a variação da temperatura interior ( $T_a$ ), da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_{s-Vidro}$ ) e na parede do corredor ( $T_{s-Parede Corredor}$ ), temperatura exterior e da radiação solar.

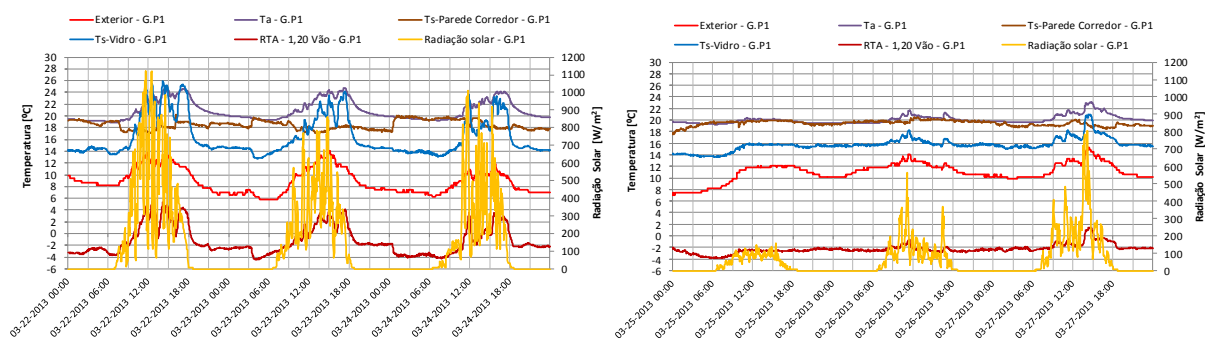


Fig.3.43. – Assimetria da temperatura radiante, calculada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado (P1) no gabinete a 1,20 m do Vão, à esquerda para Céu limpo e à direita para Céu encoberto

Os valores obtidos para a assimetria da temperatura radiante evidenciaram que esta não se constitui como um problema quer na sala de aulas, quer no gabinete (espaço com maior área envidraçada), sendo inferior a 10 °C, para o caso dos espaços serem climatizados pode apresentar valores superiores. Observa-se que a assimetria da temperatura radiante acompanha a variação da temperatura exterior e a temperatura superficial no centro do vidro. Então, como seria de esperar nos dias com céu encoberto a variação da assimetria da temperatura radiante é menor em ambos os espaços.

### 3.4.7. CONFORTO TÉRMICO

#### 3.4.7.1. Introdução

Nesta avaliação experimental pretende-se caracterizar as condições de conforto térmico, dos ocupantes no centro dos espaços e nas zonas próximas dos vãos envidraçados, na sala de aulas e no gabinete estudados. Essa análise será feita, de modo de quantificar a sensação térmica global do corpo de acordo com as principais normas em vigor (utilizando os índices PMV e PPD e a temperatura

operativa). A utilização dos índices PMV e PPD e da temperatura operativa deveu-se ao facto de se tratarem, por um lado, de modelos desenvolvidos por normas com grande reconhecimento a nível internacional e de utilização reconhecidas pela comunidade científica, e por outro lado, poderem ser aplicados ao clima nacional. Os valores apresentados nas figuras seguintes foram obtidos em intervalos de 3 minutos.

### 3.4.7.2. Índices PMV e PPD

A avaliação *in situ* do conforto térmico passou pela medição dos parâmetros ambientais e individuais necessários ao cálculo dos índices de conforto PMV e PPD, referidos no Capítulo 2. O registo dos parâmetros ambientais foi contínuo, para os parâmetros individuais considerou-se uma pessoa em pé (1,00 m de altura) com atividade metabólica de 1,2 met e 1,0 clo para o vestuário para as Campanhas de Outono e de Inverno e de 1,2 met e 0,5 clo para as Campanhas de Primavera e de Verão.

A figura 3.44 mostra os resultados para os índices de conforto PMV e PPD, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo, obtidos no centro da sala e a 1,20 m do vão envidraçado para a sala de aulas e a 1,20 m do vão envidraçado para o gabinete.

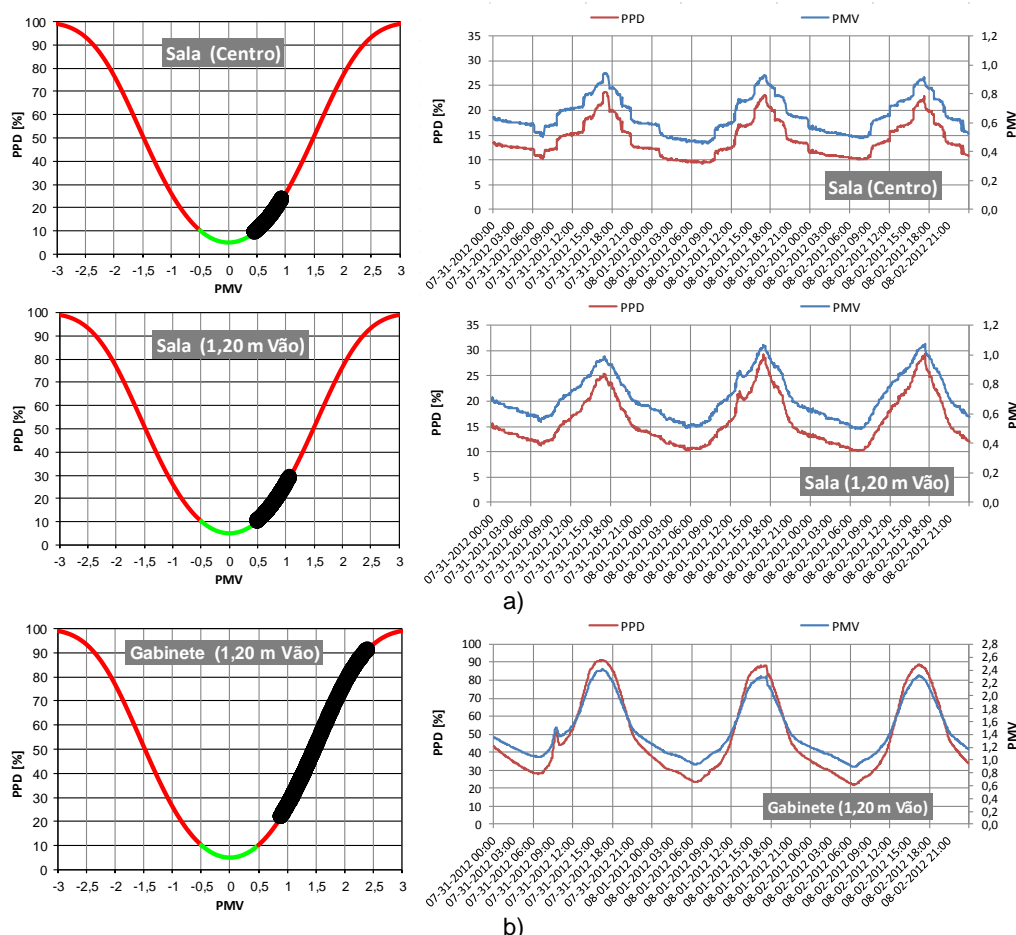


Fig.3.44. – Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Verão (V1): a) sala de aulas; b) gabinete

Podemos verificar que na sala de aulas uma parte significativa dos registos se encontra dentro da zona de conforto, que corresponde à categoria C (PPD < 15% e  $-0,7 < PMV < +0,7$ ) definida na EN ISO

7 730:2005 [40], sendo menor nas zonas próximas dos vãos, já no gabinete nas zonas próximas dos vãos todos os registos se encontram, mais dispersos e fora da zona de conforto.

A figura 3.45 mostra os resultados para os índices de conforto PMV e PPD, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Outono (O1) para céu limpo e para céu encoberto, obtidos no centro do gabinete e a 1,20 m do vão envidraçado.

Podemos verificar que no gabinete, os índices evidenciam que os utilizadores do gabinete nos dias com radiação solar regular estão sob condições de conforto, mas quando a radiação incide diretamente no interior do espaço encontram sensações de desconforto devido ao excesso de calor. Já nos dias de céu encoberto os utilizadores estão sob condições de conforto.

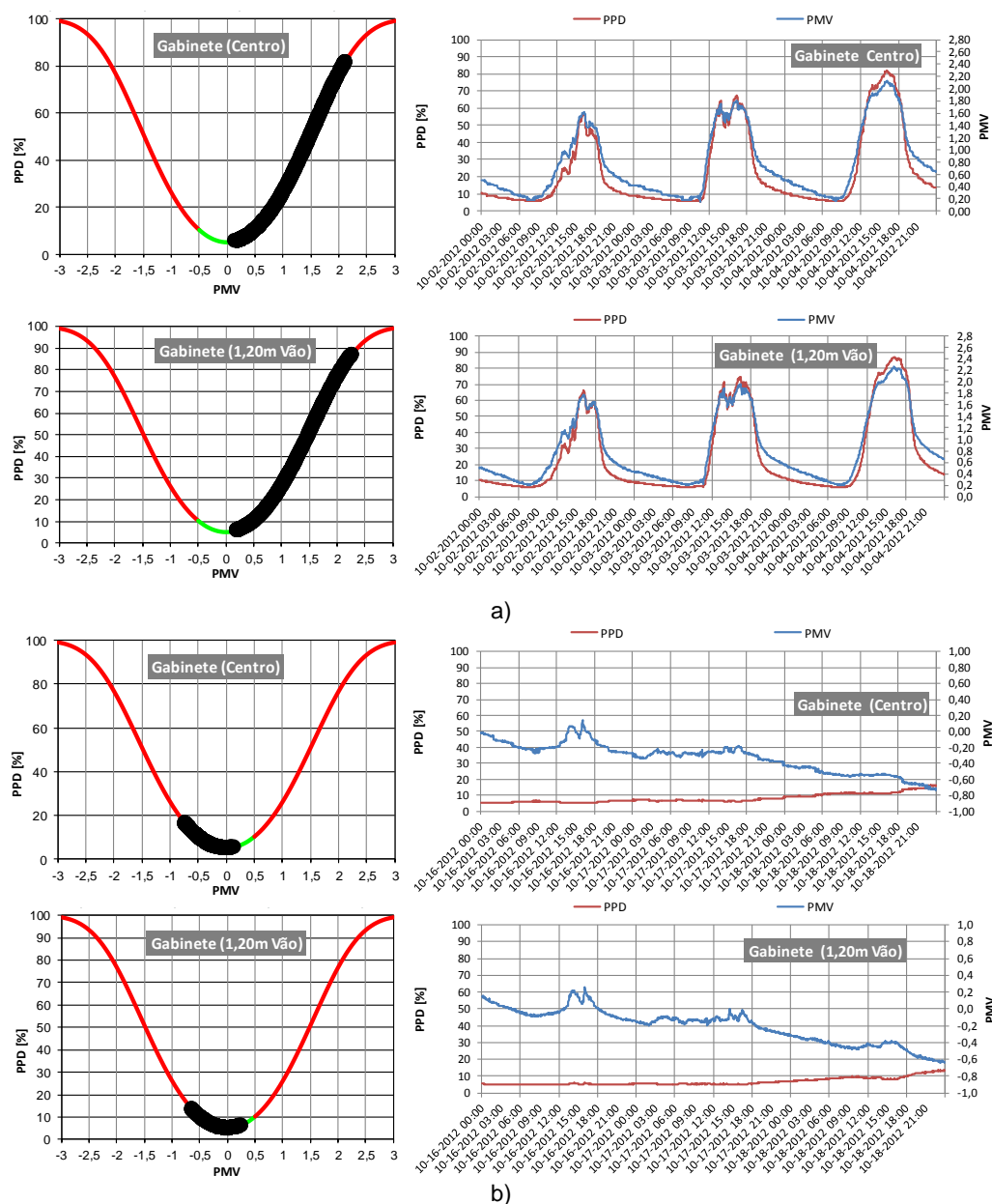


Fig.3.45. – Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Outono (O1) no centro do gabinete e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto



A figura 3.46 mostra os resultados para os índices de conforto PMV e PPD, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Inverno (I1) para céu limpo e para céu encoberto, obtidos no centro do gabinete e a 1,20 m do vão envidraçado.

Podemos verificar que no gabinete, os índices evidenciam que os utilizadores do gabinete nos dias com radiação solar regular obtêm condições de conforto durante alguns períodos, passando de sensações de moderadamente frio a frio e de moderadamente quente a quente, mas nos dias de céu encoberto encontram sensações de desconforto, moderadamente frio a frio.

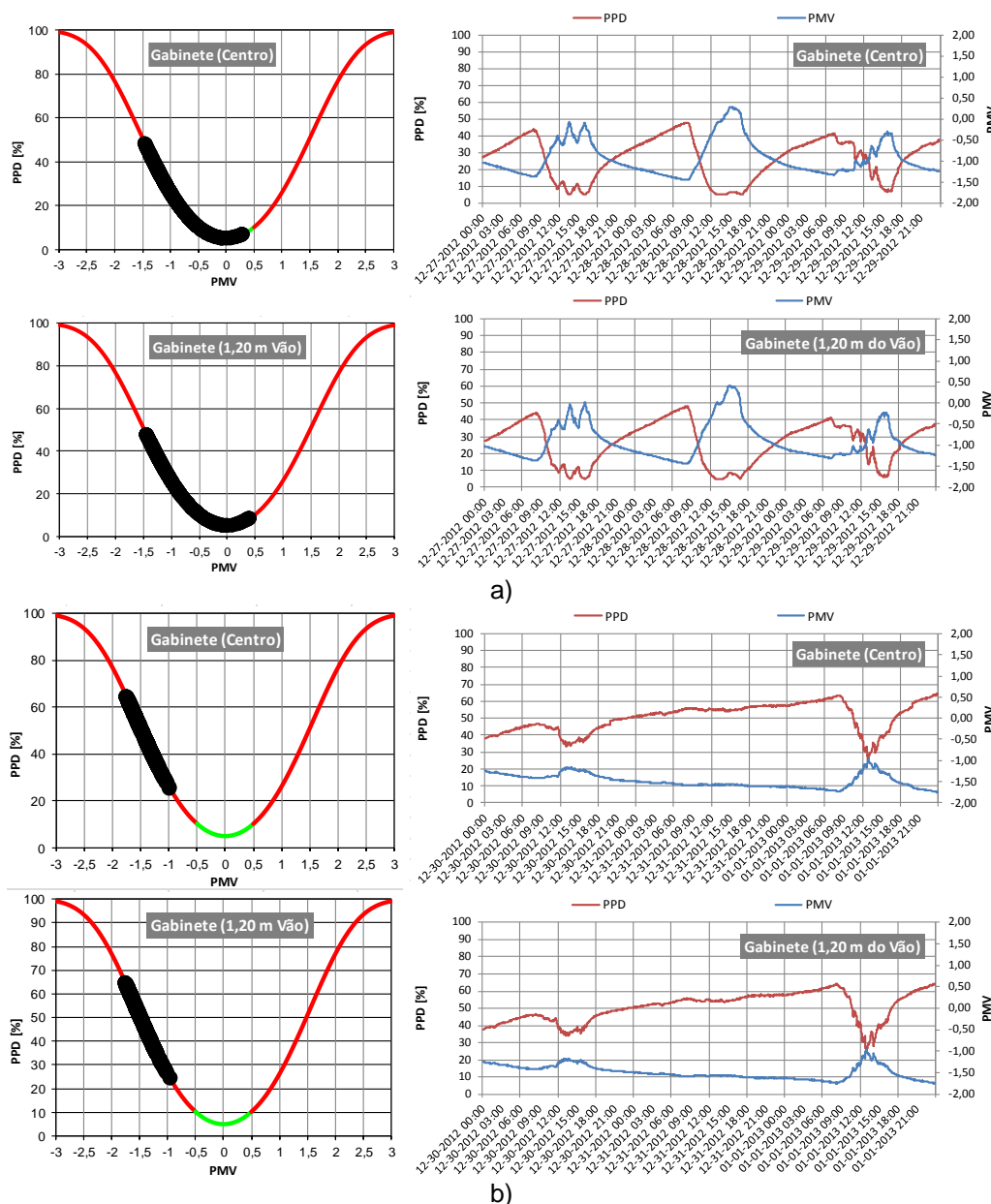


Fig.3.46. – Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Inverno (I1) no centro do gabinete a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

A figura 3.47 mostra os resultados para os índices de conforto PMV e PPD, para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Primavera (P1) para céu limpo e para céu encoberto, obtidos para o centro do gabinete a 1,20 m do vão envidraçado.

Podemos verificar que no gabinete, os índices evidenciam que os utilizadores do gabinete se encontram durante maior parte do tempo em condições aceitáveis de conforto térmico, com valores de PMV compreendidos entre -0,56 e +0,28, tando nos dias de céu limpo como nos dias de céu encoberto obtêm condições de conforto, sendo mais evidente com Céu limpo. É nítido que existe maior conforto no centro do gabinete do que a 1,20 m do vão envidraçado, durante a primavera.

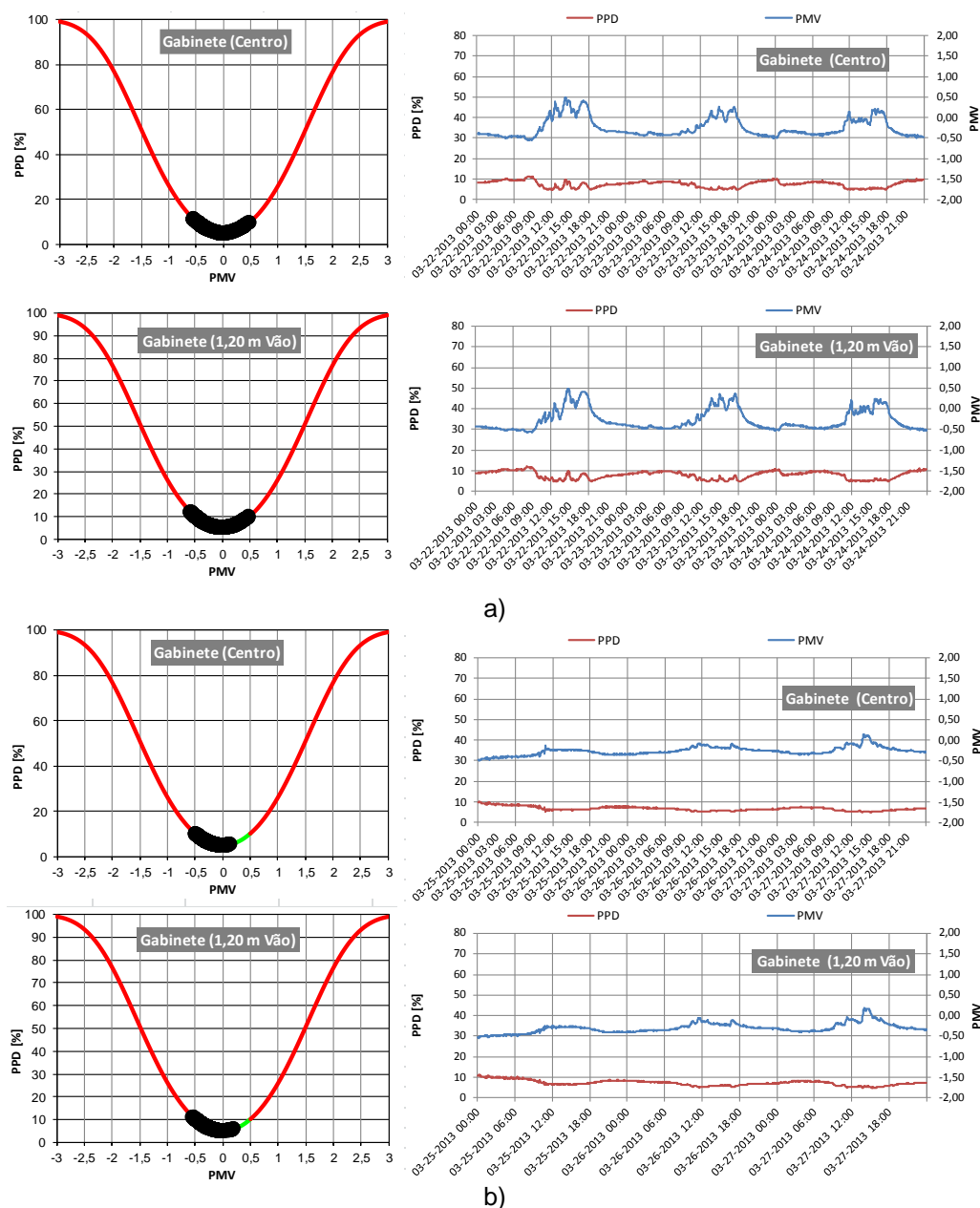


Fig.3.47. – Resultados obtidos para os índices de conforto PMV e PPD, durante a Campanha de Primavera (P1) no gabinete: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

Para complementar esta avaliação apresenta-se nos quadros 3.12 e 3.13 a análise estatística dos resultados obtidos na sala e no gabinete. Para cada espaço mostram-se os valores obtidos para cada uma das condições da envolvente, para a situação de Céu limpo e Céu encoberto.



Quadro 3.12 - Análise estatística dos Índices PMV e PPD, registadas no 1.º Ano

Campanha		Sala de Aulas (S)				Gabinete (G)				
		Centro		1,20 m Vão		Centro		1,20 m Vão		
		PMV	PPD [%]	PMV	PPD [%]	PMV	PPD [%]	PMV	PPD [%]	
V1	R	média	0,63	13,82	0,71	16,23	- / -	- / -	1,47	49,01
		máximo	0,92	23,07	1,07	29,36			2,41	91,38
		mínimo	0,46	9,35	0,50	10,21			0,89	21,89
		desvio padrão	0,13	3,74	0,17	5,35			0,44	21,67
O1	R	média					0,77	22,94	0,83	25,24
		máximo					2,12	81,81	2,26	87,07
		mínimo	- / -	- / -	- / -	- / -	0,15	5,44	0,20	5,81
		desvio padrão					0,56	22,04	0,61	24,64
	I	média					-0,33	7,99	-0,21	6,75
		máximo					0,14	16,34	0,25	13,62
		mínimo	- / -	- / -	- / -	- / -	-0,73	5,00	-0,64	5,00
		desvio padrão					0,18	2,82	0,20	2,19

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

Quadro 3.13 - Análise estatística dos Índices PMV e PPD, registadas no 2.º Ano

		Gabinete (G)				
Campanha		Centro		1,20 m Vão		
		PMV	PPD [%]	PMV	PPD [%]	
I1	R	média	-0,93	26,70	-1,49	50,50
		máximo	0,30	48,14	-0,98	64,30
		mínimo	-1,45	5,00	-1,75	25,30
		desvio padrão	0,41	12,43	0,16	8,40
	I	média	-1,38	44,52	-1,49	50,38
		máximo	-1,01	56,91	-0,95	64,15
		mínimo	-1,61	26,38	-1,75	24,02
		desvio padrão	0,13	6,79	0,16	8,32
P1	R	média	-0,27	7,65	-0,29	8,13
		máximo	0,47	11,45	0,49	11,98
		mínimo	-0,56	5,00	-0,58	5,00
		desvio padrão	0,24	1,48	0,25	1,75
	I	média	-0,27	6,67	-0,30	7,21
		máximo	0,14	10,15	0,19	11,15
		mínimo	-0,50	5,00	-0,54	5,00
		desvio padrão	0,10	1,02	0,12	1,32

R) Radiação solar regular (Céu limpo); I) Radiação solar irregular (Céu encoberto)

### 3.4.7.3. Método Gráfico Simplificado

Com o intuito de verificar se a aplicação da metodologia gráfica simplificada proposta pela norma ASHRAE 55: 2010 [37], poderá ser utilizada em substituição dos índices PMV e PPD, e obter resultados credíveis, recorrendo apenas ao registo da temperatura do ar e da humidade relativa, procedeu-se também à aplicação da metodologia gráfica simplificada.

Tal metodologia prevê como temperatura interior de referência a temperatura operativa e requer a determinação da humidade absoluta do ar a partir das medições da temperatura do ar interior e da humidade relativa.

Como já foi referido, este método consiste na definição de duas zonas de conforto referentes a diferentes tipos de vestuário (0,5 e 1,0 clo), respetivamente, para a situação de verão e de inverno. Na sua definição foi ainda considerada uma velocidade do ar inferior a 0,2 m/s e que os ocupantes dos espaços realizam tarefas sobretudo sedentárias a que correspondem valores de atividade metabólica entre 1,0 e 1,3 met.

Para esta análise, quando não foi possível determinar a temperatura operativa, durante as 24 horas do dia e em intervalos de 3 minutos, considerou-se que esta será igual à temperatura do ar, como podemos observar nas figuras 3.35 e 3.36, obteve-se uma elevada correlação entre a temperatura do ar e a temperatura operativa calculada.

A figura 3.48 mostra os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

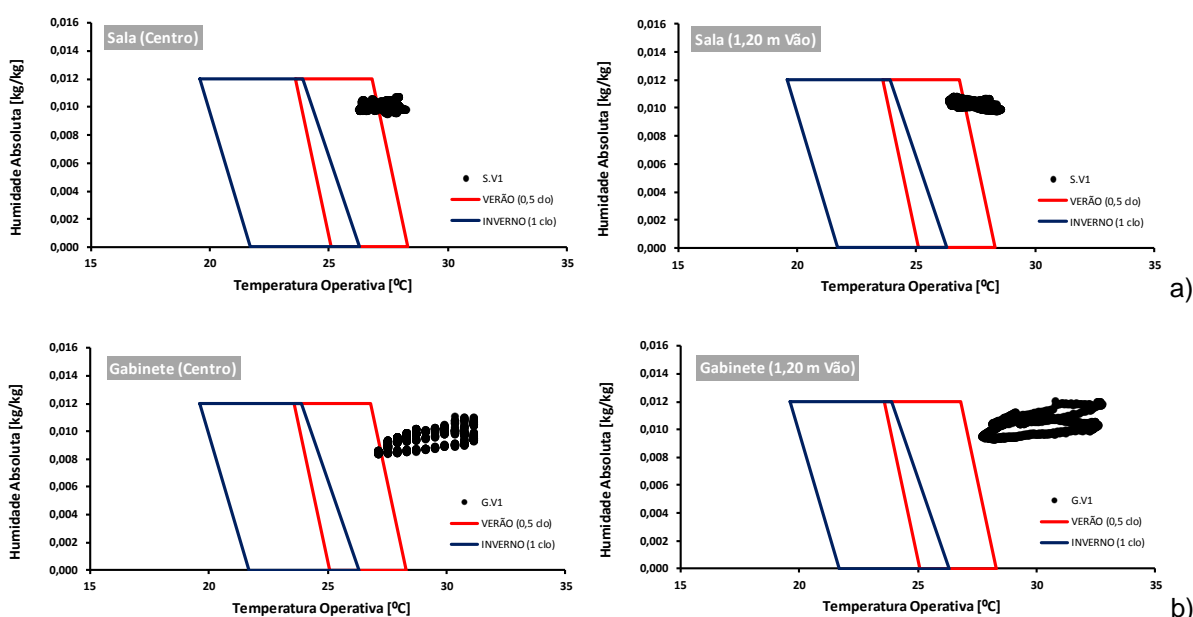


Fig.3.48. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V1) para o centro e a 1,20 m do vão: a) Sala de aulas; b) Gabinete

Podemos verificar que na sala de aulas parte dos registos se encontram dentro da zona de conforto, sendo menor nas zonas próximas dos vãos, já no gabinete nas zonas próximas dos vãos todos os registos se encontram fora da zona de conforto, tanto na sala de aulas como no gabinete.

Para complementar esta avaliação, em relação ao verão, apresenta-se nas figuras 3.49 e 3.50 os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para todas as condições da envolvente, definidas no quadro 3.4, durante a Campanha de Verão (V) para céu limpo, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

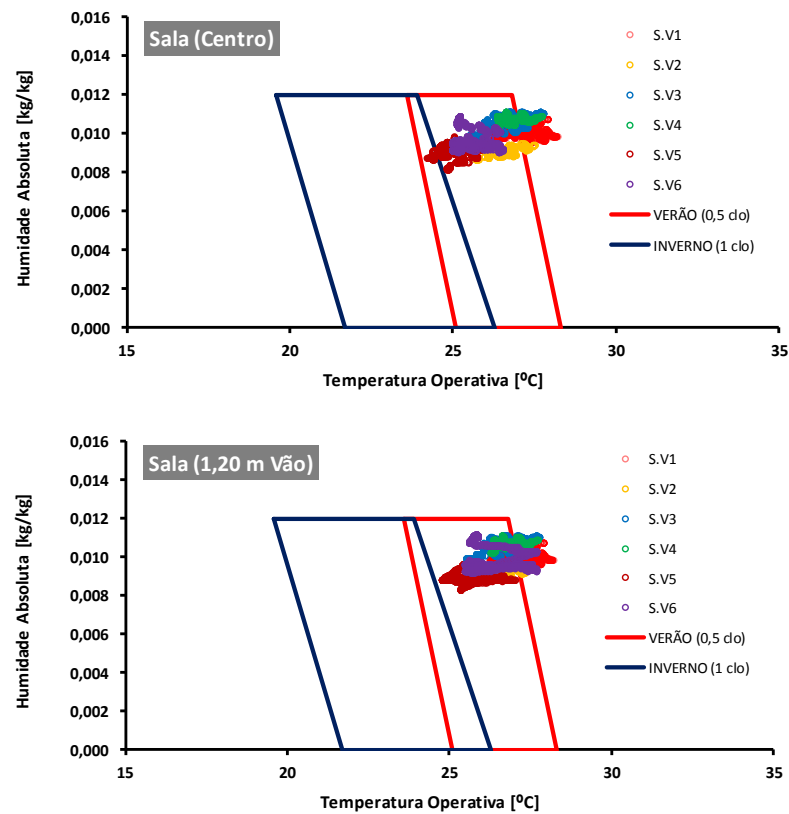


Fig.3.49. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V) para o centro da sala de aulas e a 120 m do vão

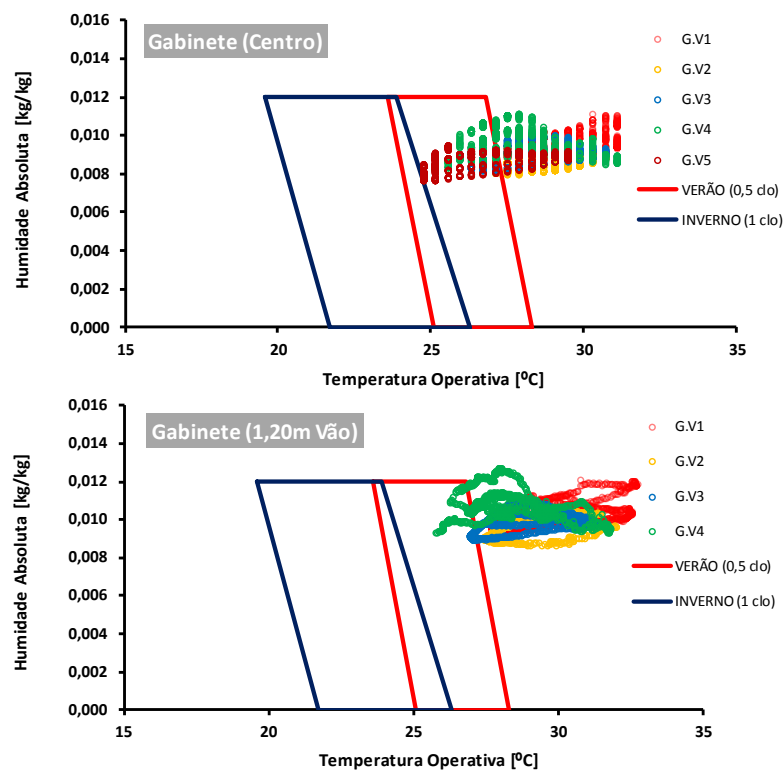


Fig.3.50. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V) para o centro do gabinete e a 120 m do vão

Ao observar os resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Verão (V), podemos concluir que:

- Na sala de aulas grande parte dos resultados se encontram dentro da zona de conforto térmico, relativa ao verão, mesmo a 1,20 m do vão envidraçado, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos e a maior parte encontra-se fora da zona de conforto a 1,20 m do vão;
- Para a condição (V2 – estore 100% ativado com lâminas na vertical) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico na sala de aulas, mas a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete não é suficiente, apresentando todos os valores fora da zona de conforto, por sobreaquecimento;
- Para a condição (V3 – estore 100% ativado com lâminas na vertical, com recirculação do ar interior) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico na sala de aulas, em relação as condições interior, mas verifica-se um aumento da humidade absoluta do ar, a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete não sendo suficiente, apresenta uma melhoria das condições de conforto, no entanto todos os valores fora da zona de conforto, por sobreaquecimento;
- Para a condição (V4 – estore 100% ativado com lâminas na vertical, com abertura basculante das janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto, durante todo o dia) a melhoria das condições de conforto térmico verificada na sala de aulas, em relação a condição inicial (V.1) é menor, devido à entrada de ar quente durante as horas mais quentes do dia, a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete não sendo suficiente, apresenta uma melhoria das condições de conforto, apresentando alguns valores dentro da zona de conforto, principalmente durante a noite;
- Para a condição (V5 – estore 100% ativado com lâminas na horizontal) verifica-se uma melhoria significativa das condições de conforto térmico verificada na sala de aulas, em relação a condição inicial (V1), no centro do gabinete também apresenta uma melhoria das condições de conforto, por falha no equipamento de medição não temos dados para este período a 1,20 m do vão envidraçado.
- Comparando as condições V6 e V1 (estore 0% ativado) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico verificada em V6 em relação à condição V1, devendo-se essa melhoria as condições climáticas verificadas durante as medições, já que condições da envolvente são iguais.

A figura 3.51 mostra os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para a situação com os vãos com o estore 0% ativados durante a Campanha de Outono (O1) para céu limpo e céu encoberto, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

Podemos verificar que, para céu limpo, na sala de aulas todos os registos se encontram, dentro da zona de conforto, enquanto, no gabinete uma parte dos registos se encontra fora da zona de conforto, desconforto por excesso de calor. Já nos dias de céu encoberto parte dos registos encontra-se fora das zonas de conforto, mas para a sensação de frio, tanto na sala de aulas como no gabinete.

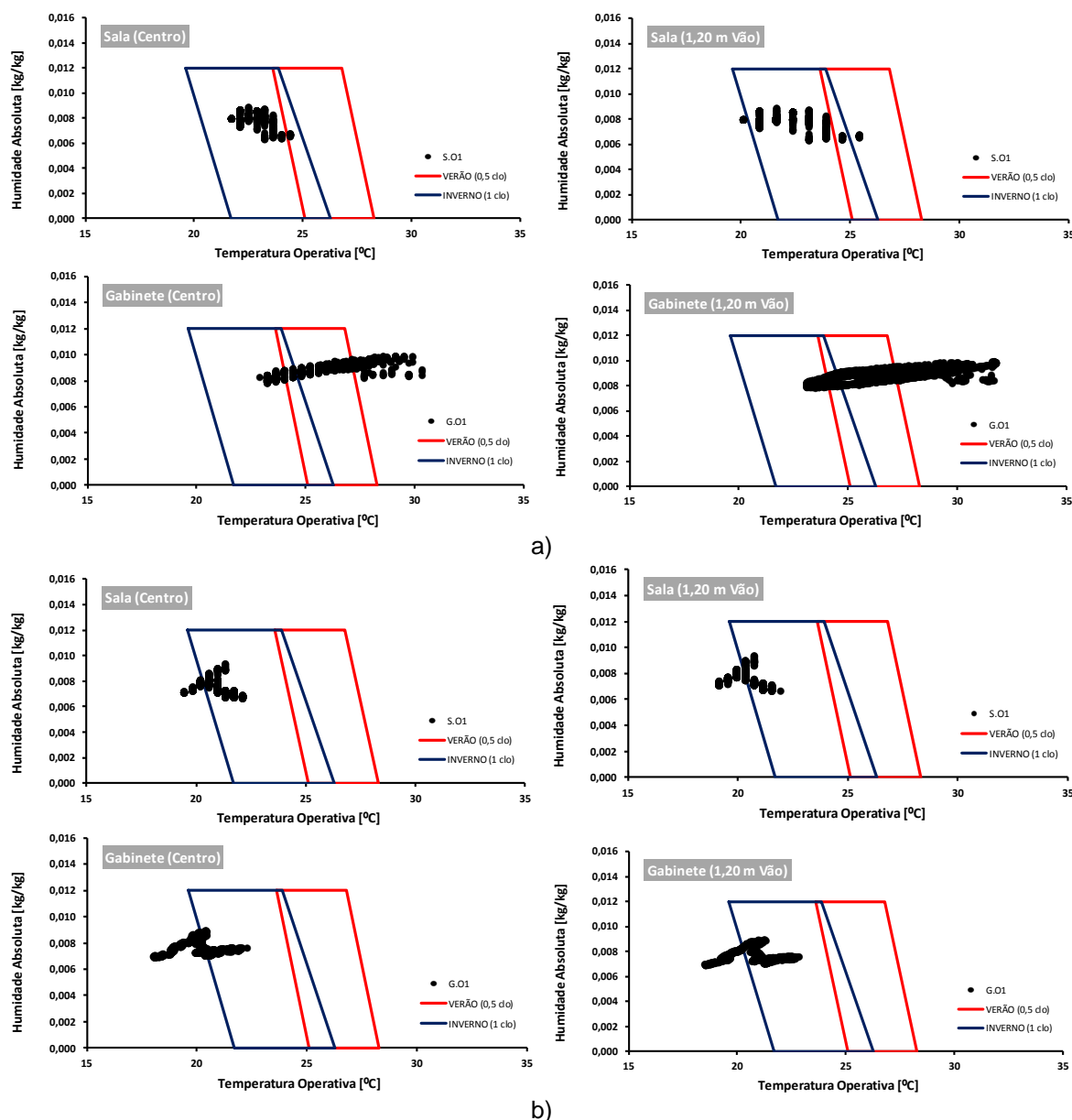


Fig.3.51. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Outono (O1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto

A figura 3.52 mostra os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Inverno (I1) para céu limpo e céu encoberto, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.

Em relação à Campanha de Inverno, sem sistema de aquecimento ligado, podemos verificar que no centro da sala de aulas todos os registos se encontram fora da zona de conforto, para a sensação de frio, mas nas zonas próximas do vão obtiveram-se alguns registos dentro da zona de conforto nos dias com radiação solar regular, esta situação foi semelhante no gabinete tanto no centro como a 1,20 m do vão envidraçado, e muitos também fora dessa zona. Já nos dias sem radiação solar podemos verificar que tanto na sala de aulas como no gabinete todos os registos se encontram fora da zona de conforto, para a sensação de frio.

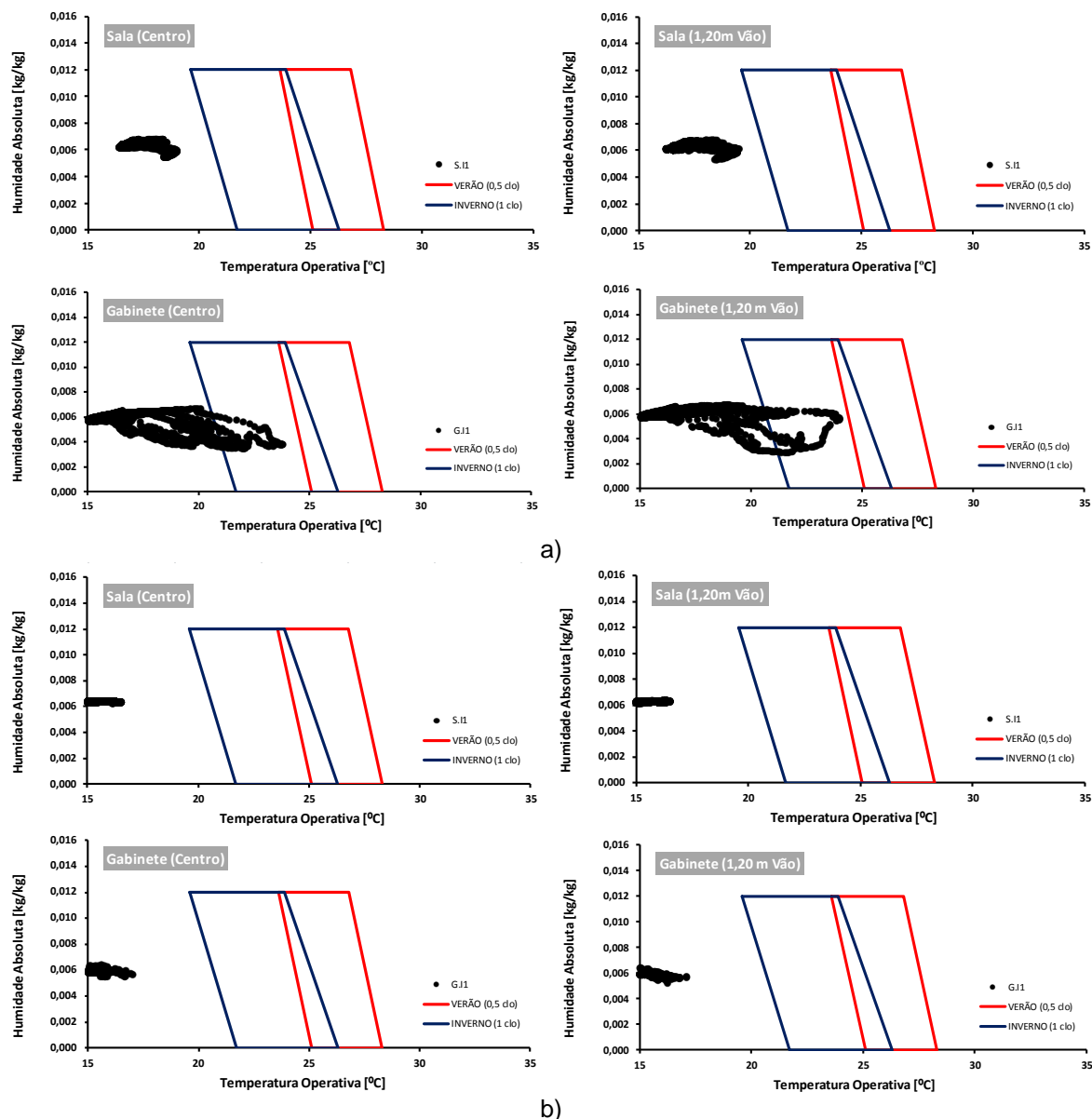


Fig.3.52. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico durante a campanha de inverno (I1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto

Para complementar esta avaliação, em relação ao inverno, apresentam-se nas figuras 3.53 e 3.54 os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para todas as condições da envolvente, definidas no quadro 3.5, durante a Campanha de Inverno (I) para céu limpo e céu encoberto, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

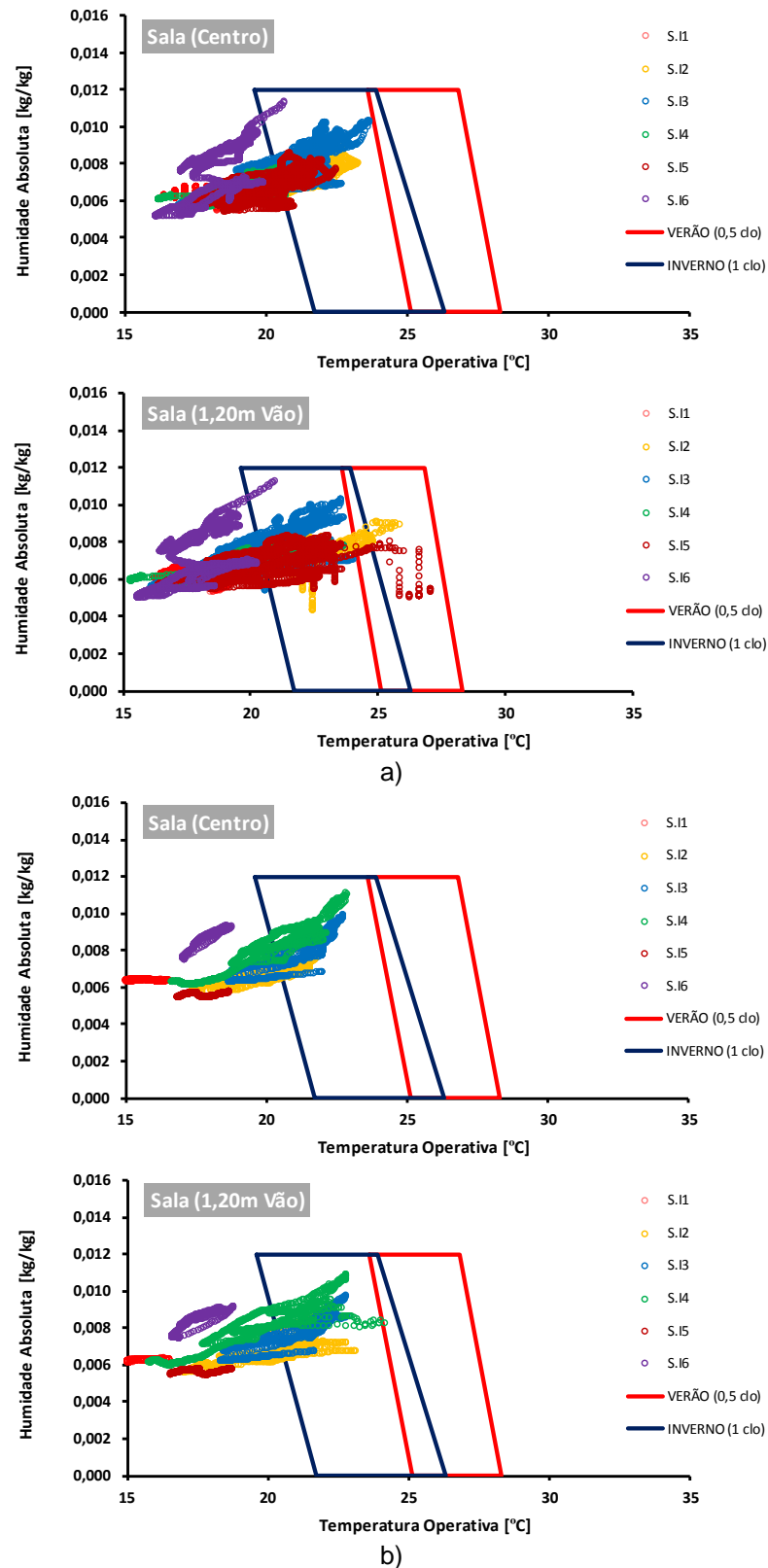


Fig.3.53. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Inverno (I) para o centro da sala de aulas e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

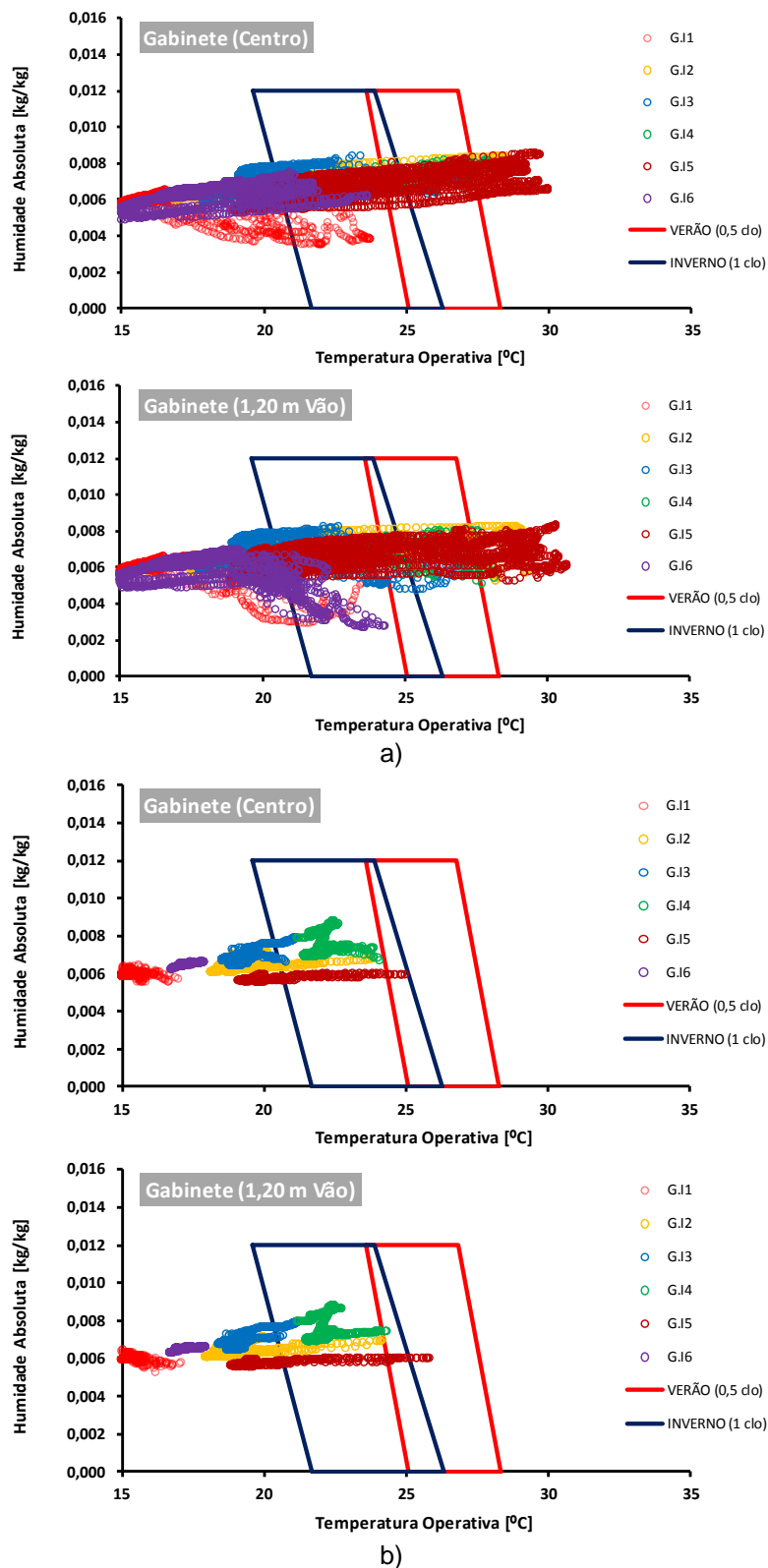


Fig.3.54. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Inverno (I) para o centro do gabinete e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto



Ao observar os resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Inverno (I), podemos concluir que:

- Em ambos os espaços em análise, nos dias de céu limpo, grande parte dos resultados encontram-se dentro da zona de conforto térmico, mesmo no centro dos espaços, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos e a maior parte encontra-se fora da zona de conforto, com registos de desconforto por excesso de calor;
- Para a condição (I2 – estore 0% ativado, sistema de aquecimento ligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mesmo nos dias de céu encoberto;
- Para a condição (I3 – estore 100% ativado com lâminas na vertical, sistema de aquecimento desligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mesmo nos dias de céu encoberto, mas menos acentuada que para a situação I2;
- Para a condição (I4 – estore 100% ativado com lâminas na horizontal, sistema de aquecimento ligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mesmo nos dias de céu encoberto, mas menos acentuada que para a situação I2 na sala de aulas e mais acentuada no gabinete;
- Para a condição (I5 – estore 0% ativado, sistema de aquecimento ligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mesmo nos dias de céu encoberto, mas menos acentuada que para a situação I2 na sala de aulas e mais acentuada no gabinete;
- Para a condição (I6 – estore 100% ativado com lâminas inclinadas a 45°, e sistema de aquecimento desligado) verifica-se uma melhoria pouco significativa das condições de conforto térmico em ambos espaços, mesmo nos dias de céu encoberto, mas menos acentuada nos dias de céu encoberto e mais acentuada nos dias de céu limpo em ambos os espaços analisados.

A figura 3.55 mostra os resultados obtidos pela aplicação da metodologia gráfica simplificada para os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Primavera (P1) para céu limpo e céu encoberto, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.

Em relação à Campanha de Primavera, nos dias de céu limpo, mesmo sem sistema de aquecimento ligado, podemos verificar que na sala de aulas nas zonas próximas dos vãos envidraçados, existem registos dentro da zona de conforto mas em muito pequeno número. Já nos dias de céu encoberto podemos verificar que na sala de aulas todos os registos se encontram fora da zona de conforto para a sensação de frio. No gabinete, tanto no centro como a 1,20 m do vão envidraçado, podemos verificar que a maior parte dos registos se encontram dentro da zona de conforto nos dias com radiação solar regular, o mesmo acontece nos dias de céu encoberto mas em menor número.

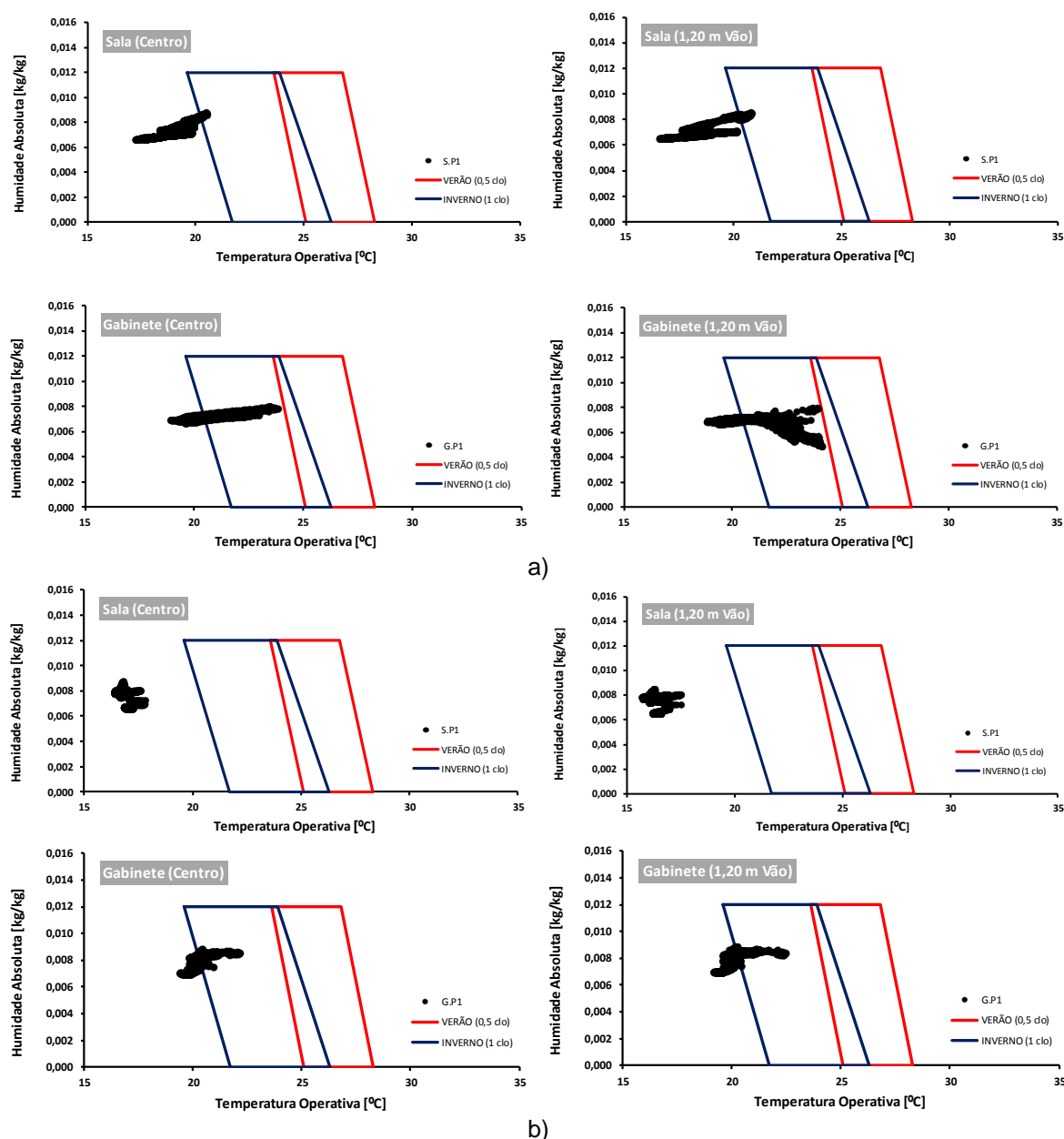


Fig.3.55. – Resultados obtidos por aplicação do método gráfico simplificado durante a Campanha de Primavera (P1): a) Céu limpo; b) Céu encoberto

#### 3.4.7.4. Modelos Adaptativos

A utilização de metodologias adaptativas para avaliar as condições de conforto térmico de um espaço interior faz todo o sentido, uma vez que os ocupantes podem alterar as condições da envolvente e por vezes a sua localização e vestuário. A grande dificuldade está associada com os limites a considerar, que dificilmente podem ser os mesmos para realidades socioculturais distintas. A capacidade de adaptação das pessoas não é idêntica, estando fortemente condicionada pelos hábitos instalados, resultantes em grande medida do clima existente no local, idade e estado de saúde. Deste modo, a generalização de uma metodologia pode ser uma tarefa algo complexa.

Neste estudo foram utilizados três modelos de conforto térmico adaptativos, descritos no ponto 2 do capítulo 3, o modelo referido na ASHRAE 55: 2010 [37], o modelo proposto pela EN 15 251:2007

[46] e o modelo proposto pelo LNEC [4]. O modelo adaptativo da norma ASHRAE 55 não se aplica quando a temperatura média exterior é inferior a 10 °C e superior a 32 °C, o modelo adaptativo da norma EN 15 251 é específico para a estação de arrefecimento (verão), sendo no entanto de utilização viável para as estações de aquecimento (inverno), em que os valores dos limites superiores e inferiores que delimitam a zona de conforto térmico podem ser consideradas tal como o edifício fosse climatizado, o modelo do LNEC pode ser utilizado para todas as estações.

Tal como no método gráfico simplificado, também estes modelos incluem a temperatura operativa como um dos dados de entrada, para os espaços em que não se registou esse parâmetro, na análise também se considerou que a temperatura operativa no centro do gabinete era igual à temperatura do ar, na localização em estudo.

As figuras 3.56 e 3.57 mostram os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos, para a situação com os vãos com o estore 0% ativos durante a Campanha de Verão (V1) para céu limpo, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.

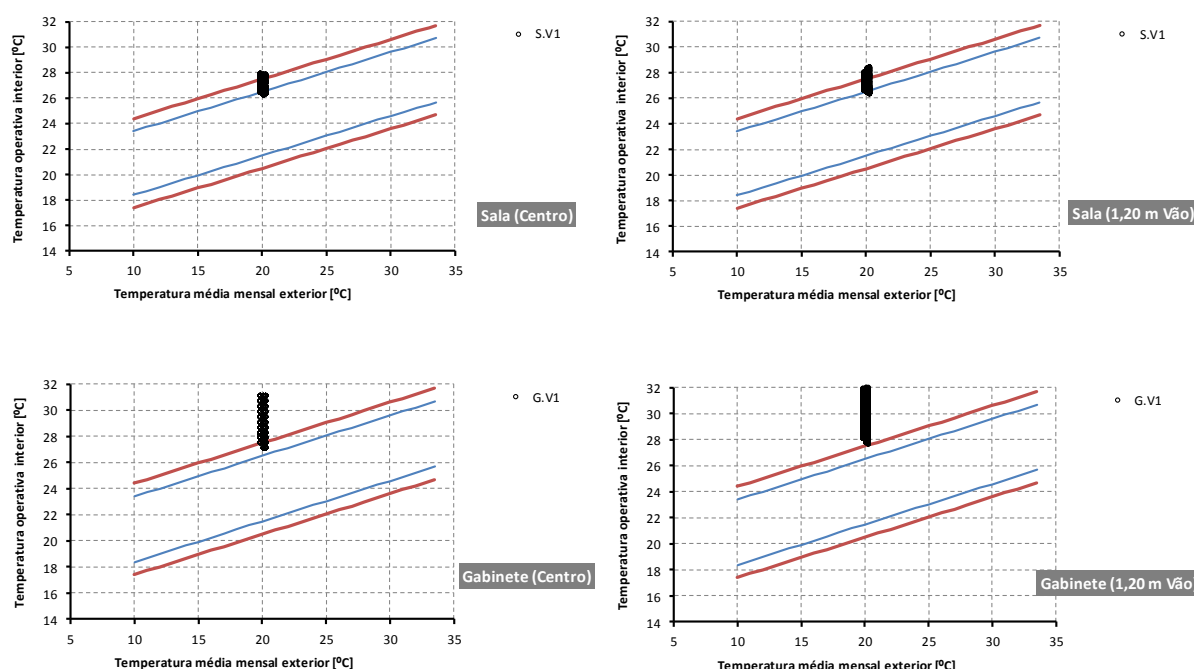


Fig.3.56. – Avaliação do conforto térmico por aplicação de modelos adaptativos, durante a Campanha de Verão (V1), para céu limpo: modelo da ASHRAE 55

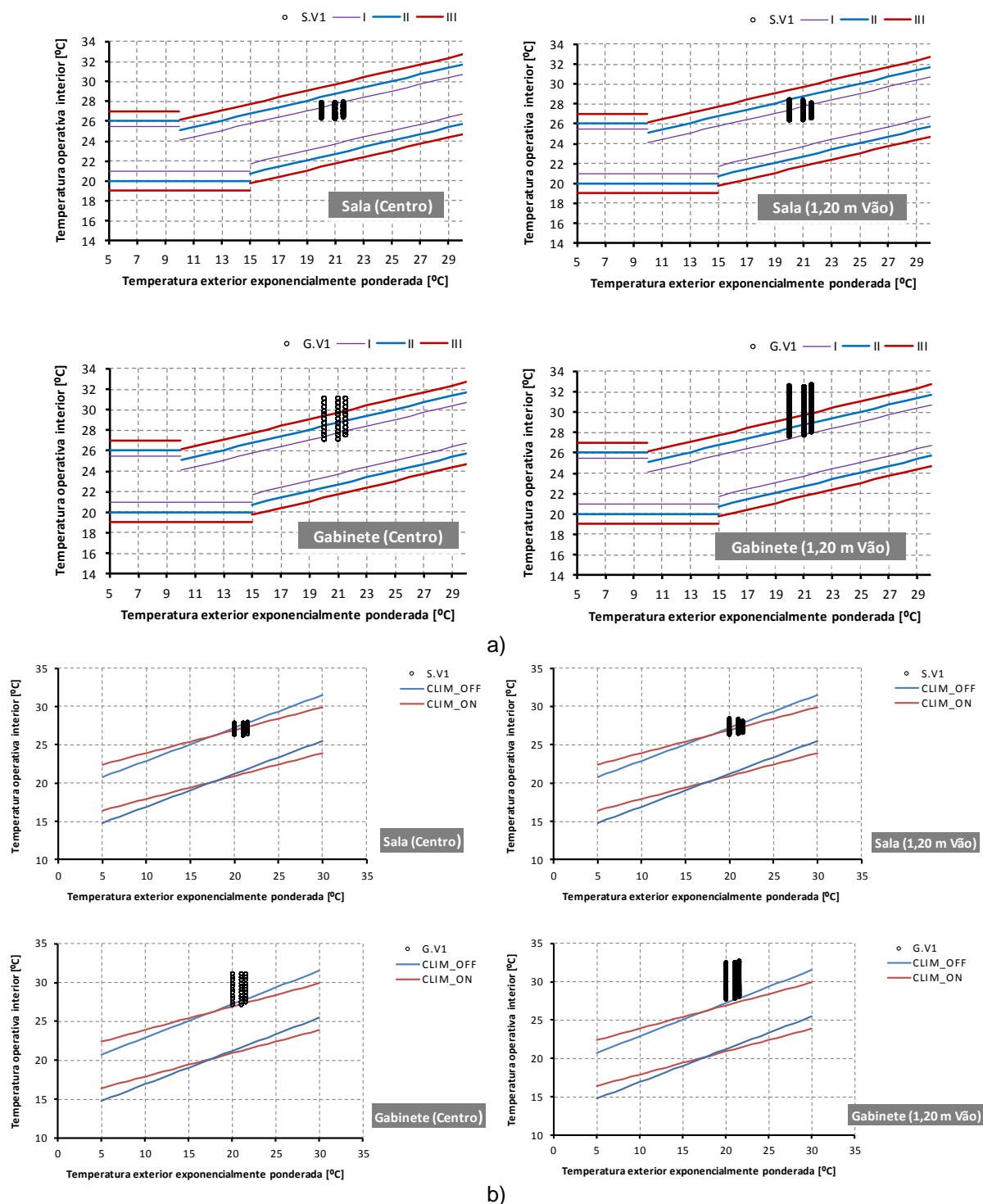
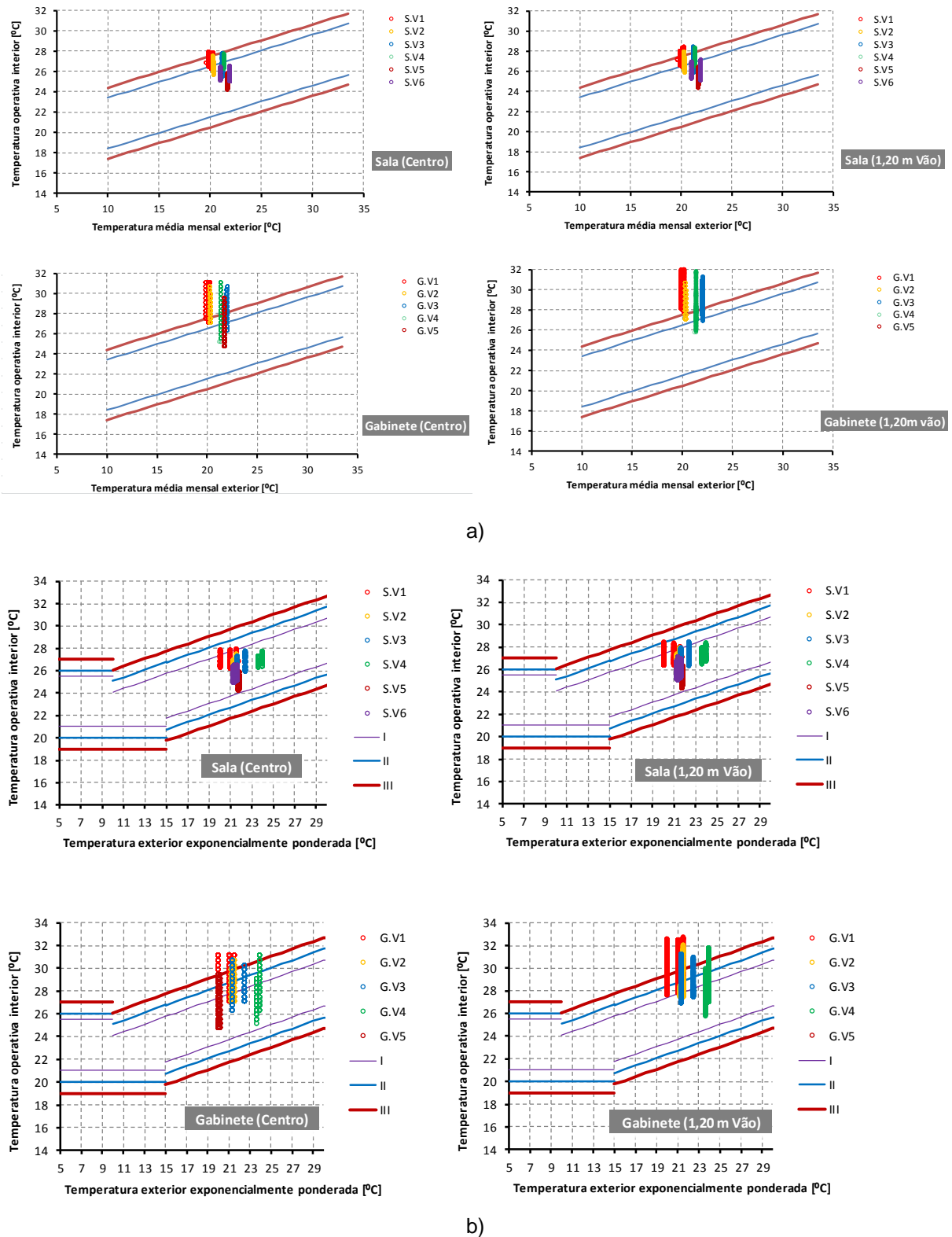


Fig.3.57. – Avaliação do conforto térmico por aplicação de modelos adaptativos, durante a Campanha de Verão (V1), para céu limpo: a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC

Para complementar esta avaliação apresenta-se nas figuras 3.58 e 3.59 os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos para todas as condições da envolvente durante a Campanha de Verão (V) para céu limpo, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.



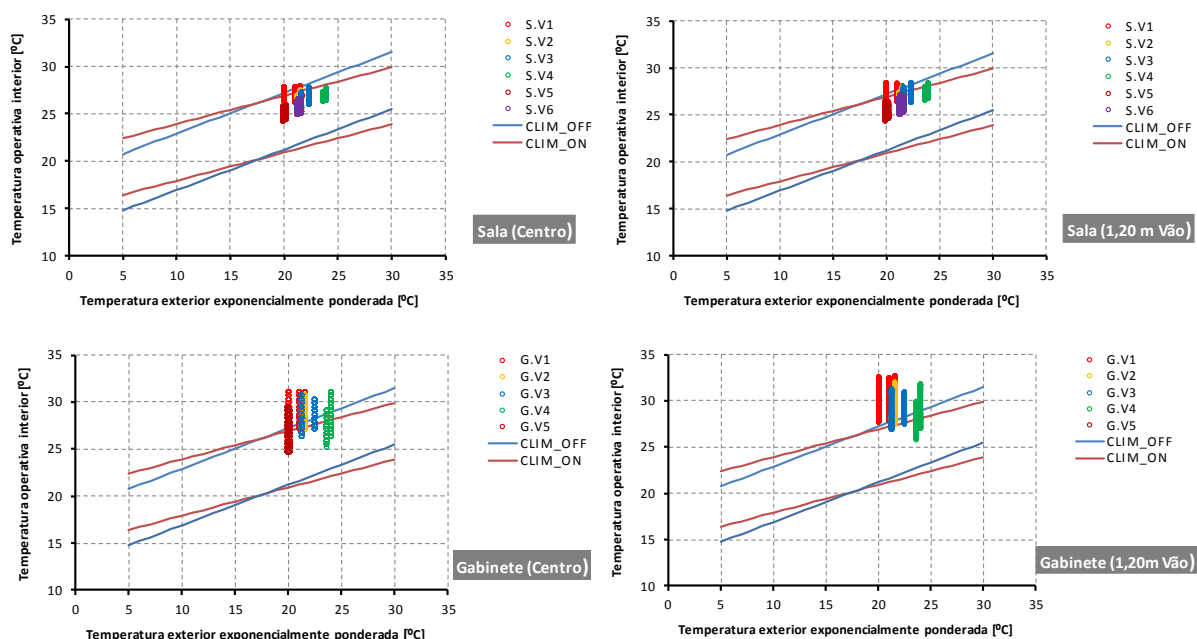


Fig.3.59. – Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo a Campanha de Verão (V) para o centro e a 120 m do vão: modelo do LNEC

Ao observar os resultados obtidos por aplicação dos modelos adaptativos durante a Campanha de Verão (V), podemos concluir que:

- No geral, para todos os modelos adaptativos utilizados obtivemos as mesmas condições de conforto térmico;
- Na sala de aulas grande parte dos resultados se encontram dentro da zona de conforto térmico dos 80%, mesmo a 1,20 m do vão envidraçado, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos e a totalidade encontra-se fora da zona de conforto a 1,20 m do vão envidraçado
- Para a condição (V2 – estore 100% ativado com lâminas na vertical) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico na sala de aulas, mas a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete não é suficiente, apresentando todos os valores fora da zona de conforto, por sobreaquecimento;
- Para a condição (V3 – estore 100% ativado com lâminas na vertical, com recirculação do ar interior) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico tanto na sala de aulas como no gabinete, mas no gabinete não é suficiente, apresenta ainda muitos valores fora da zona de conforto, por sobreaquecimento;
- Para a condição (V4 – estore 100% ativado com lâminas na vertical, com abertura das janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto, durante todo o dia) a melhoria das condições de conforto térmico verificada na sala de aulas, em relação à condição inicial (V.1) é menor, devido à entrada de ar quente durante as horas mais quentes do dia, a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete não sendo suficiente, apresenta uma melhoria das condições de conforto, apresentando alguns valores dentro da zona de conforto, principalmente durante a noite;
- Para a condição (V5 – estore 100% ativado com lâminas na horizontal) verifica-se uma significativa melhoria das condições de conforto térmico na sala de aulas, grande parte dos resultados encontram-se dentro da zona de conforto térmico dos 90%, e no centro do gabinete,

em relação a condição inicial (V.1), por falha no equipamento de medição não temos dados para este período a 1,20 m do vão envidraçado.

As figuras 3.60 e 3.61 mostram os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Outono (O1), para céu limpo e para céu encoberto, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.

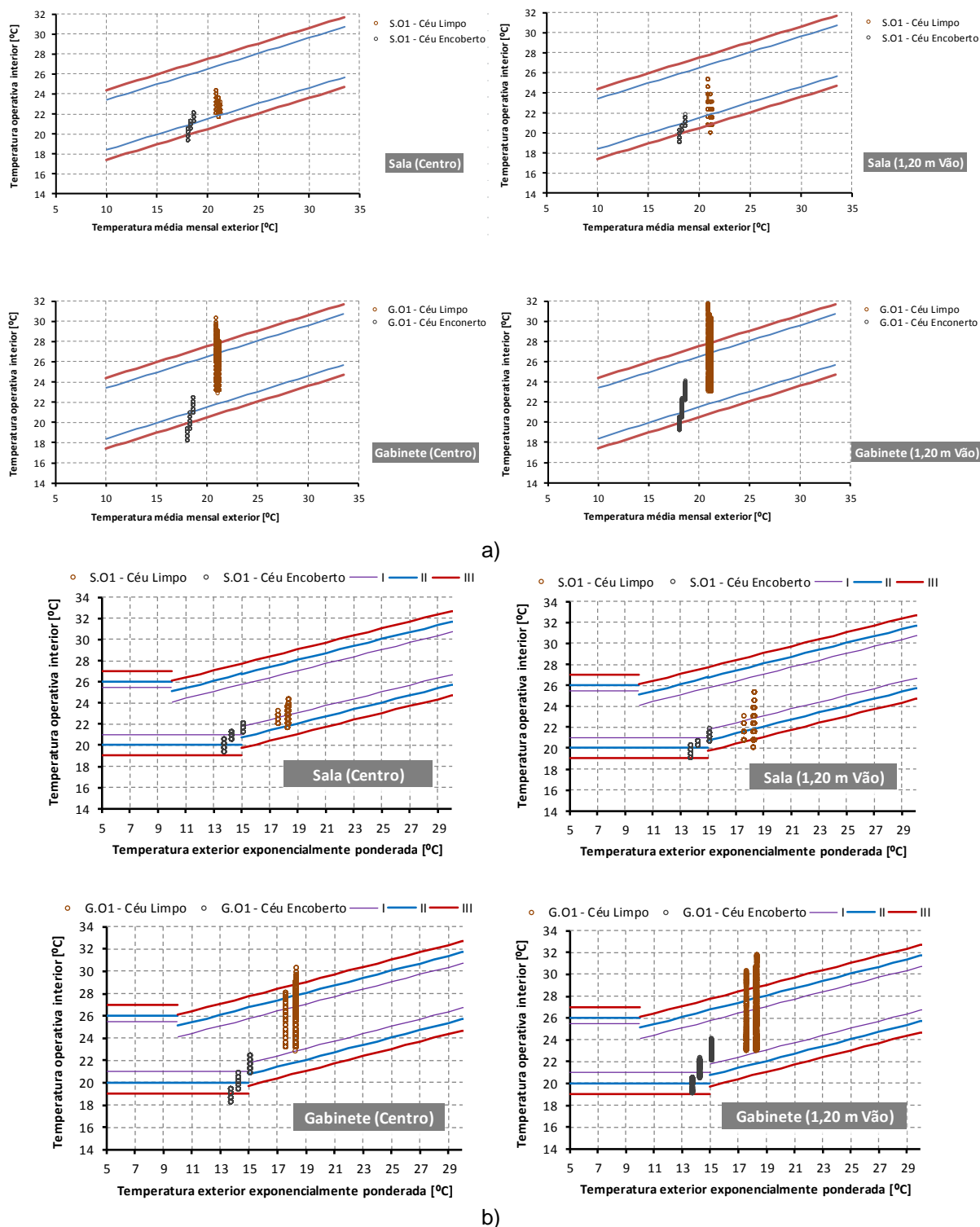


Fig.3.60. – Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Outono (O1): a) modelo da ASHRAE 55; b) Modelo da EN 15 251

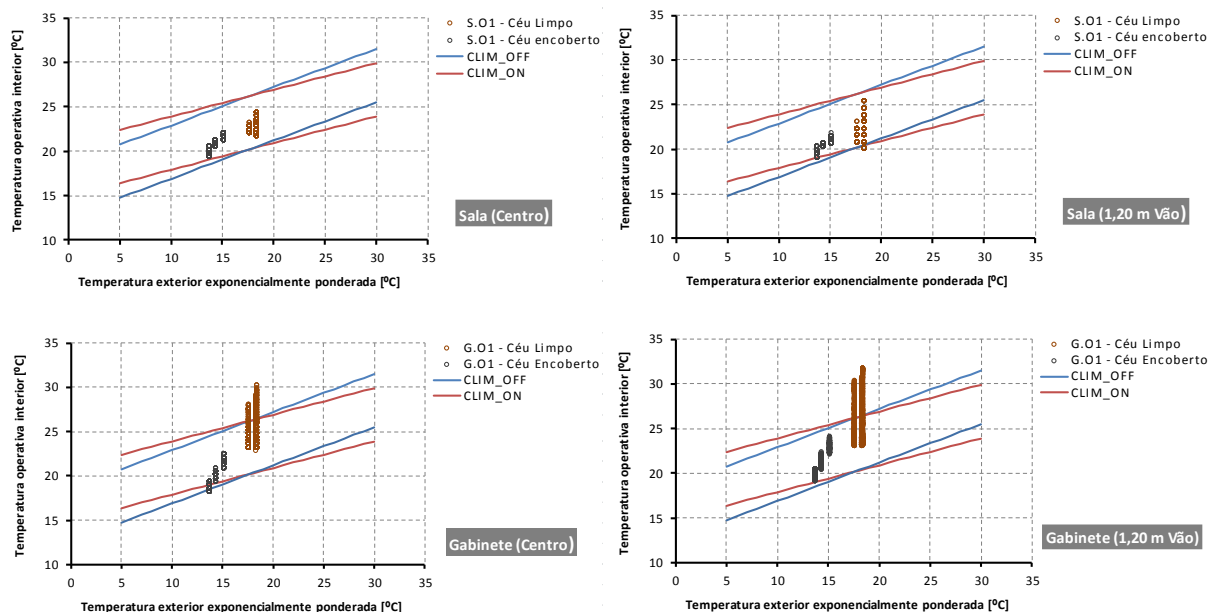


Fig.3.61. – Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Outono (O1): modelo do LNEC

Para complementar esta avaliação apresenta-se nas figuras 3.62 e 3.63 os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos para todas as condições da envolvente durante a Campanha de Outono (O) para céu limpo, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

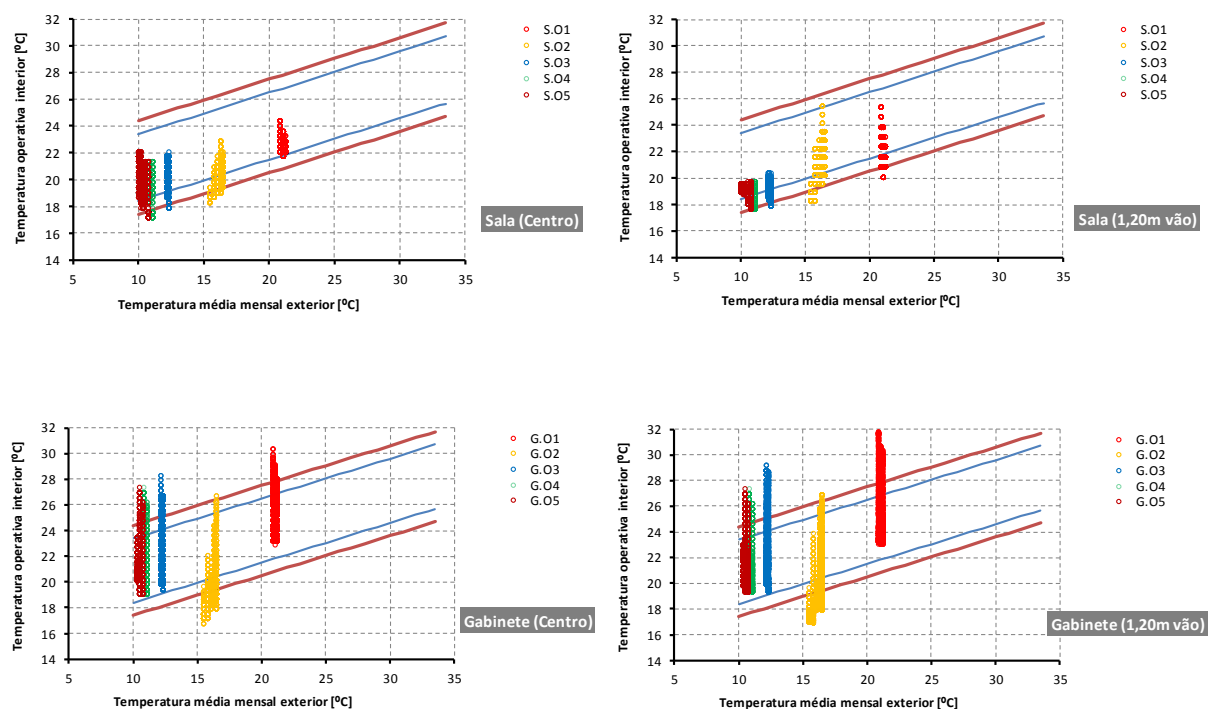


Fig.3.62. – Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos a Campanha de Outono (O) para o centro e a 120 m do vão: modelo da ASHRAE 55



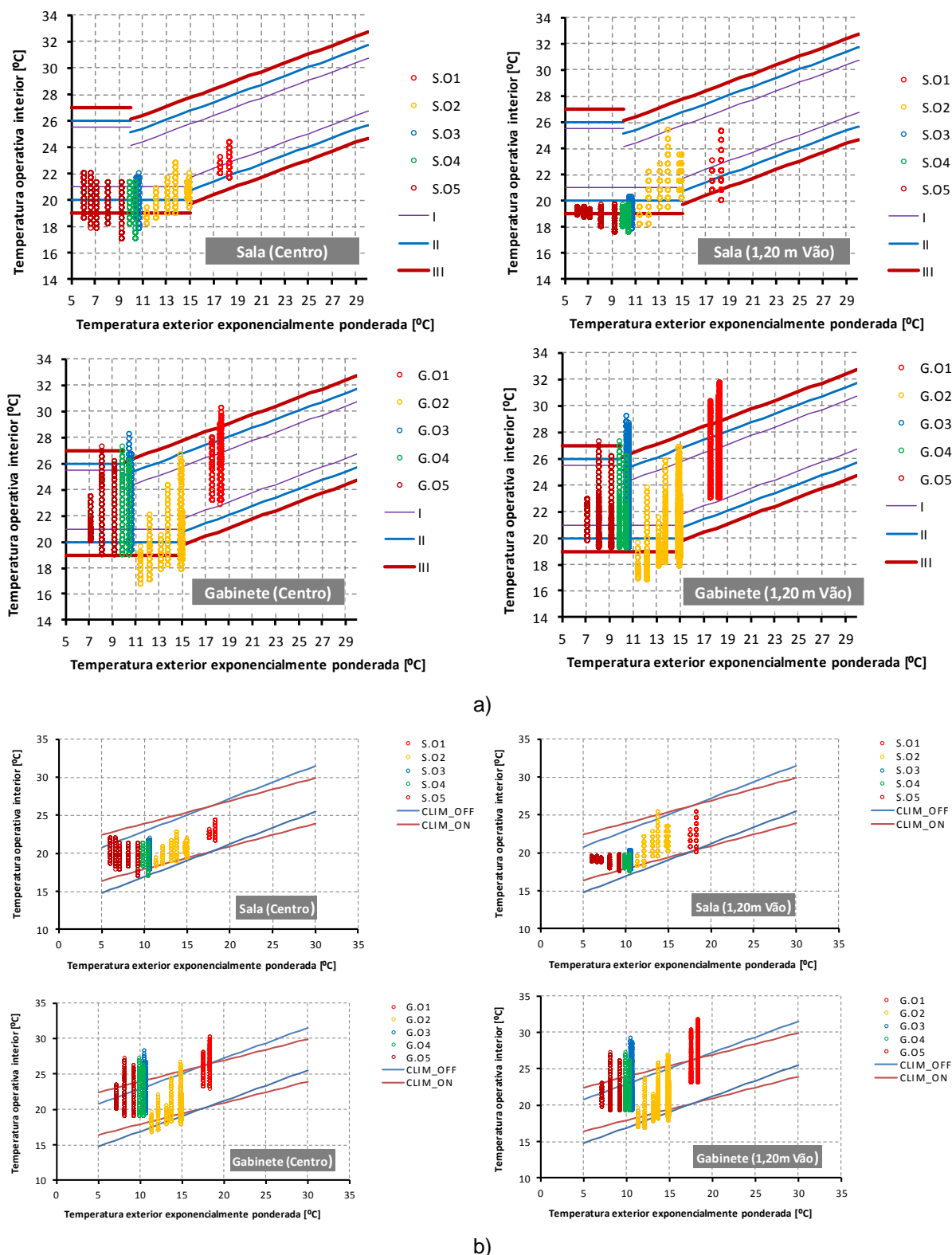


Fig.3.63. – Resultados obtidos para a avaliação do conforto térmico por aplicação do modelo adaptativo a Campanha de Outono (O) para o centro e a 120 m do vão: a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC

Ao observar os resultados obtidos por aplicação dos modelos adaptativos durante a Campanha de Outono (O), podemos concluir que:

- No geral, para todos os modelos adaptativos utilizados obtivemos as mesmas condições de conforto térmico;
- Na sala de aulas todos os resultados encontram-se dentro da zona de conforto térmico dos 90%, mesmo a 1,20 m do vão envidraçado, mas mais dispersos, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos e uma parte deles encontra-se fora da zona de conforto, por sobreaquecimento, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado
- Para a condição (O2 – estore 100% ativado com lâminas na posição vertical, com sistema de climatização desligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma diminuição das condições de conforto térmico em ambos os espaços, apresentando valores fora da zona de conforto por arrefecimento, sendo menor a 1,20 m do vão envidraçado;
- Para a condição (O3 – estore 100% ativado com lâminas na posição vertical, com sistema de climatização ligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma diminuição das condições de conforto térmico em ambos os espaços, apresentando valores fora da zona de conforto por sobreaquecimento, sendo maior a 1,20 m do vão envidraçado;
- Para a condição (O4 – estore 100% ativado com lâminas na posição horizontal, com sistema de climatização ligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma diminuição das condições de conforto térmico em ambos os espaços, apresentando valores fora da zona de conforto por arrefecimento, sendo menor a 1,20 m do vão envidraçado;
- Para a condição (O5 – estore 0% ativado, com sistema de climatização desligado e com ocupação na sala de aulas) verifica-se uma diminuição das condições de conforto térmico em ambos os espaços, apresentando valores fora da zona de conforto por sobreaquecimento, sendo maior a 1,20 m do vão envidraçado.

As figuras 3.64 e 3.65 mostram os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Inverno (I1), para céu limpo e para céu encoberto, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.

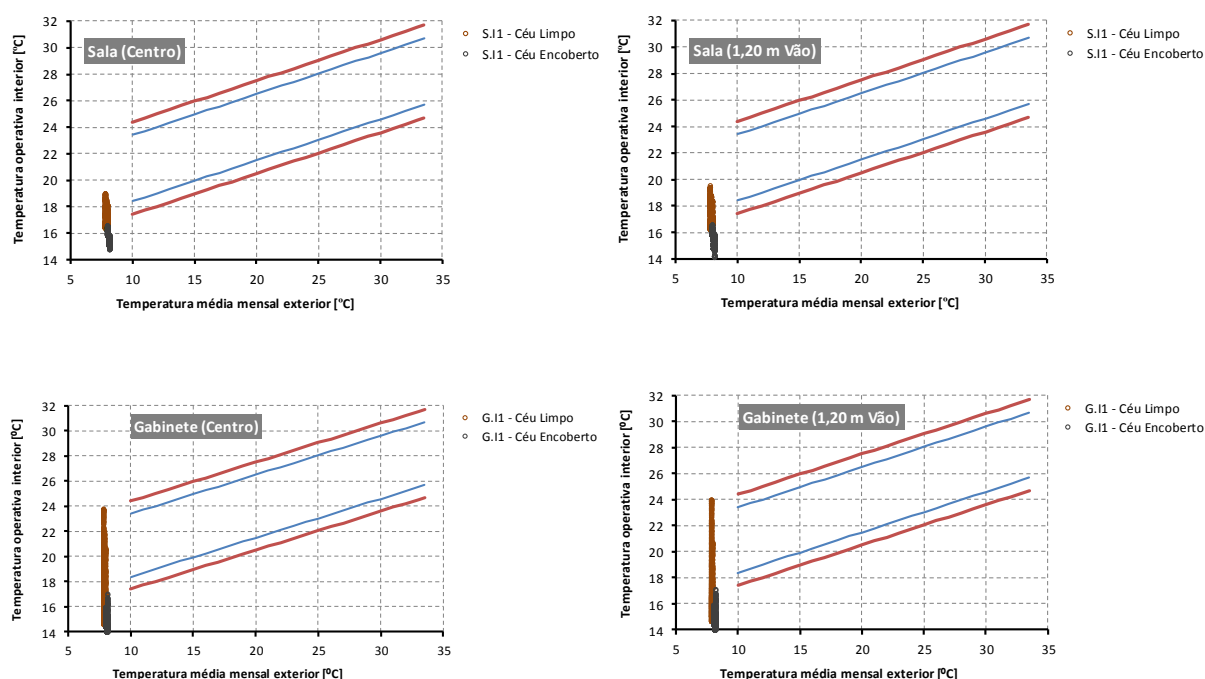


Fig.3.64. – Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Inverno (I1), para céu limpo: modelo da ASHRAE 55

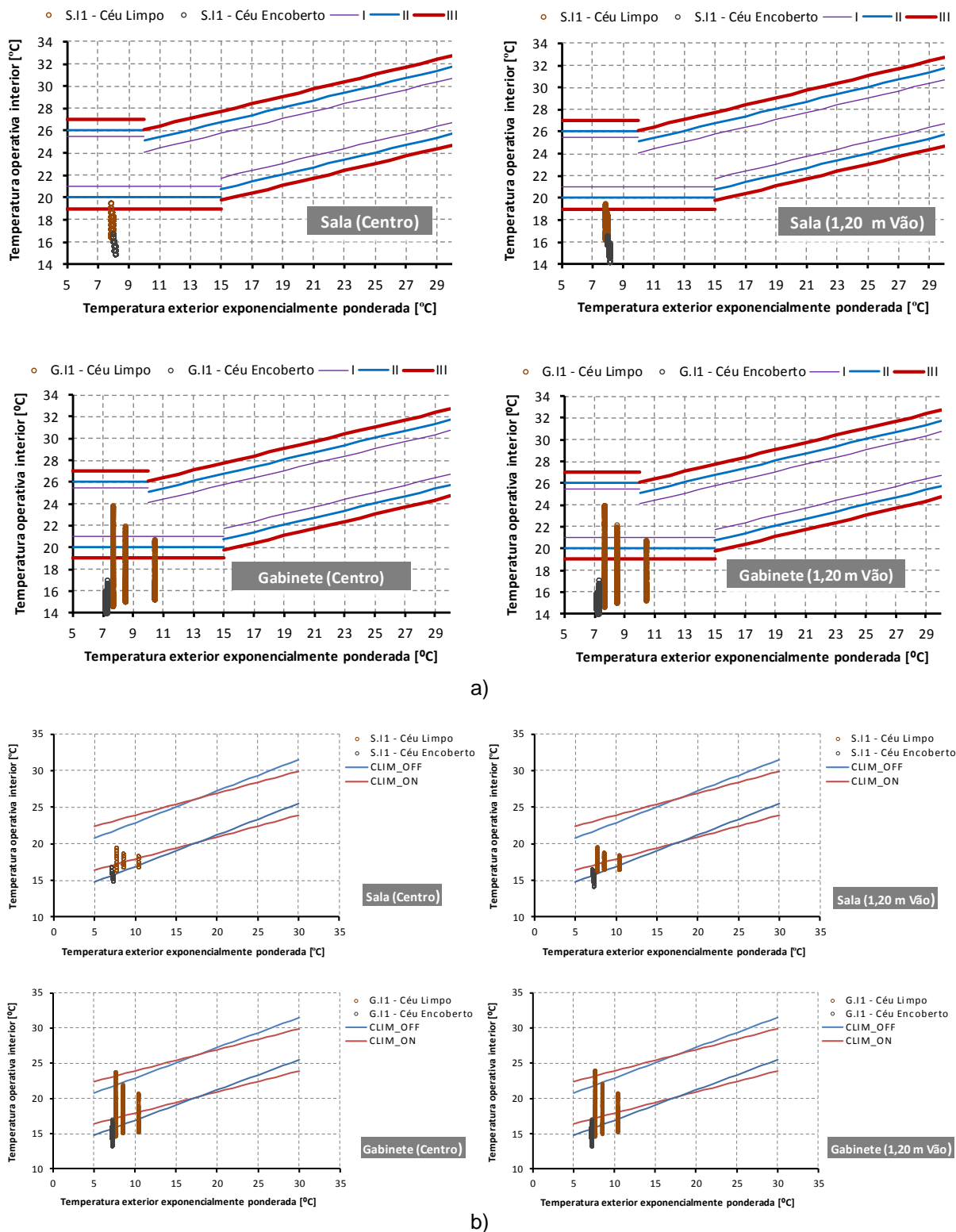


Fig.3.65. – Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Inverno (I1): a) Modelo da EN 15 251; b) modelo do LNEC

Para complementar esta avaliação apresenta-se nas figuras 3.66 e 3.67 os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos da norma EN 15 251 e do LNEC para todas as condições da envolvente durante a Campanha de Inverno (I) para céu limpo e para céu encoberto, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

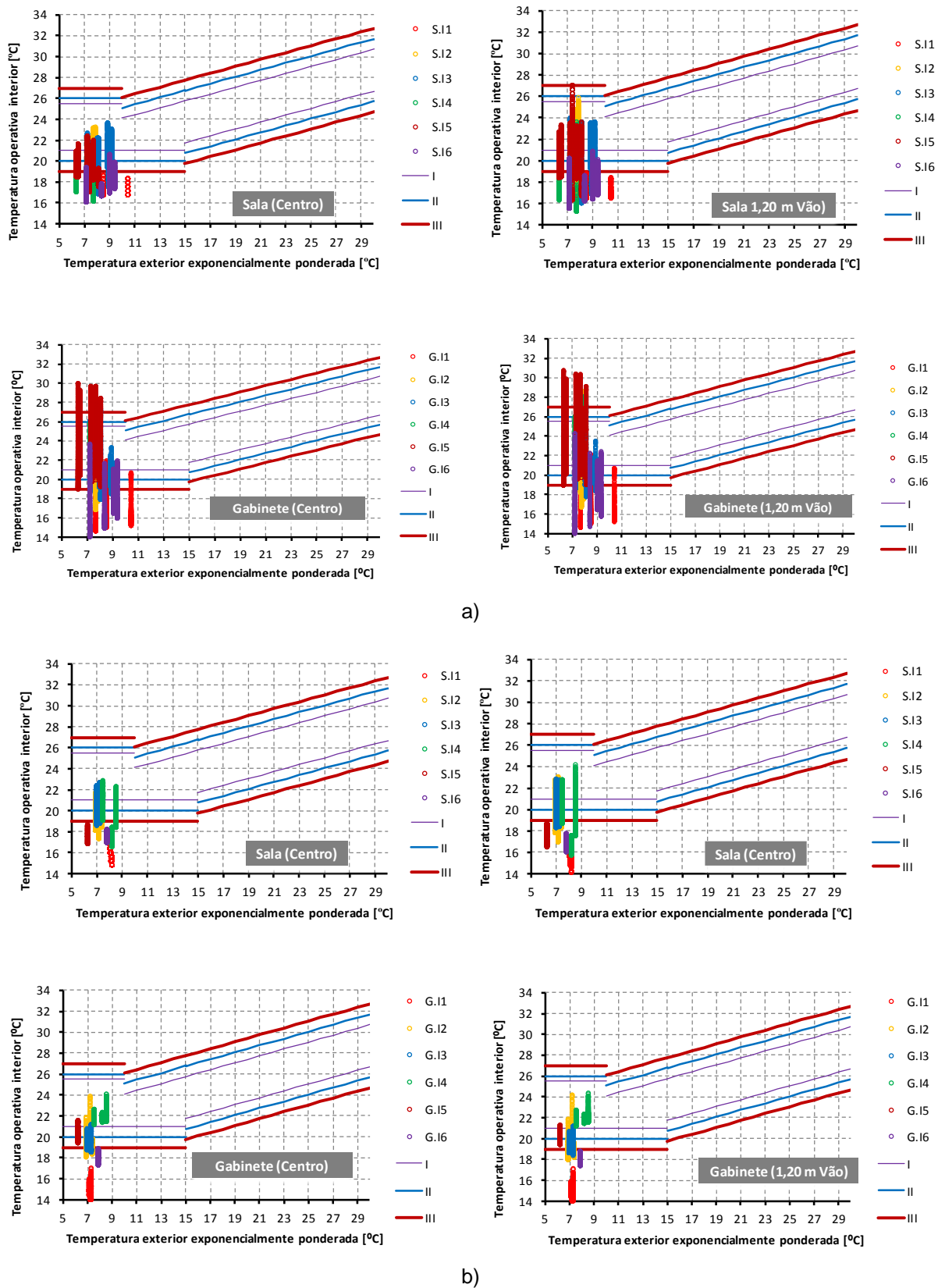


Fig.3.66. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo modelo da EN 15 251 durante a campanha de inverno (I) para o centro e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

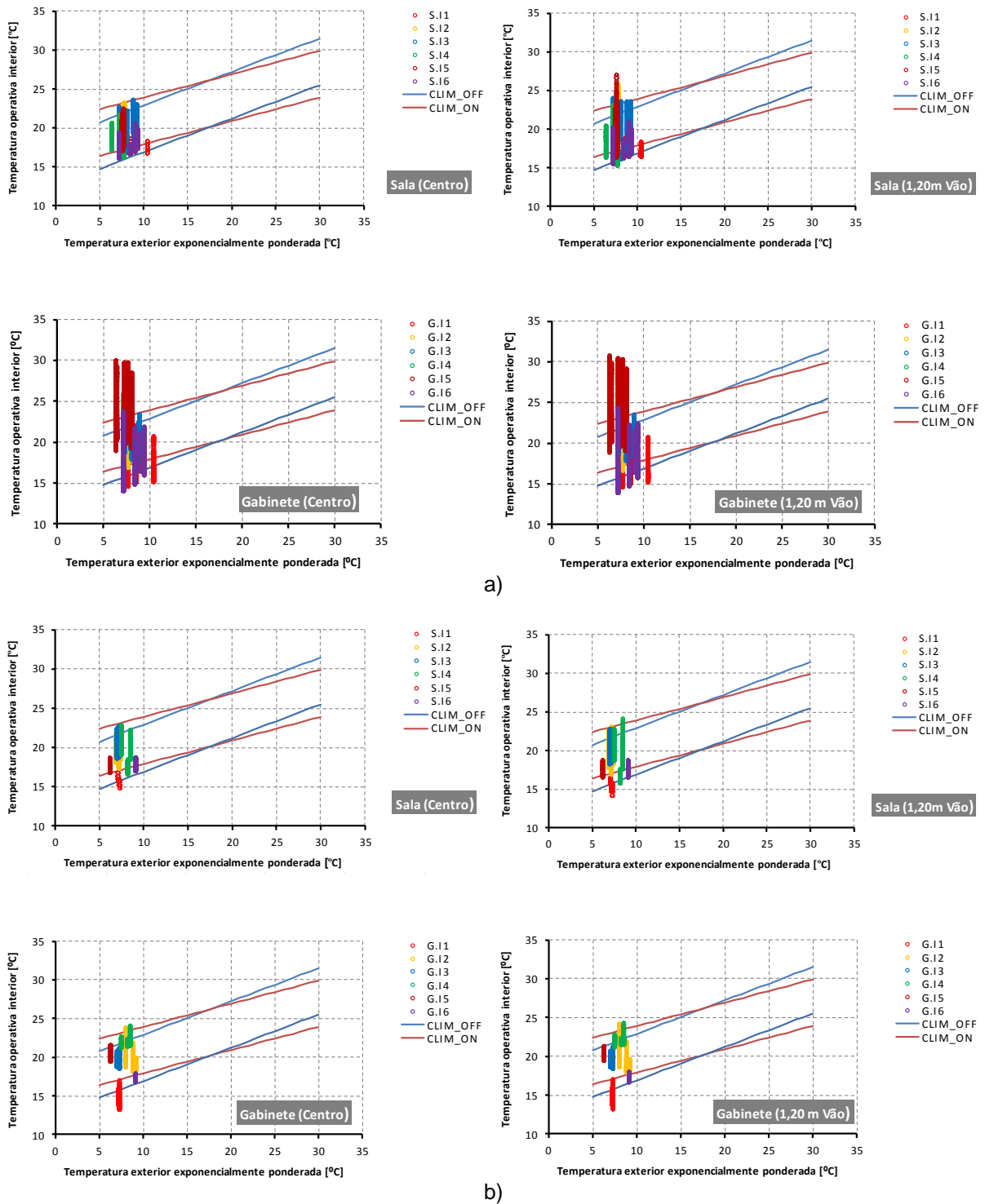
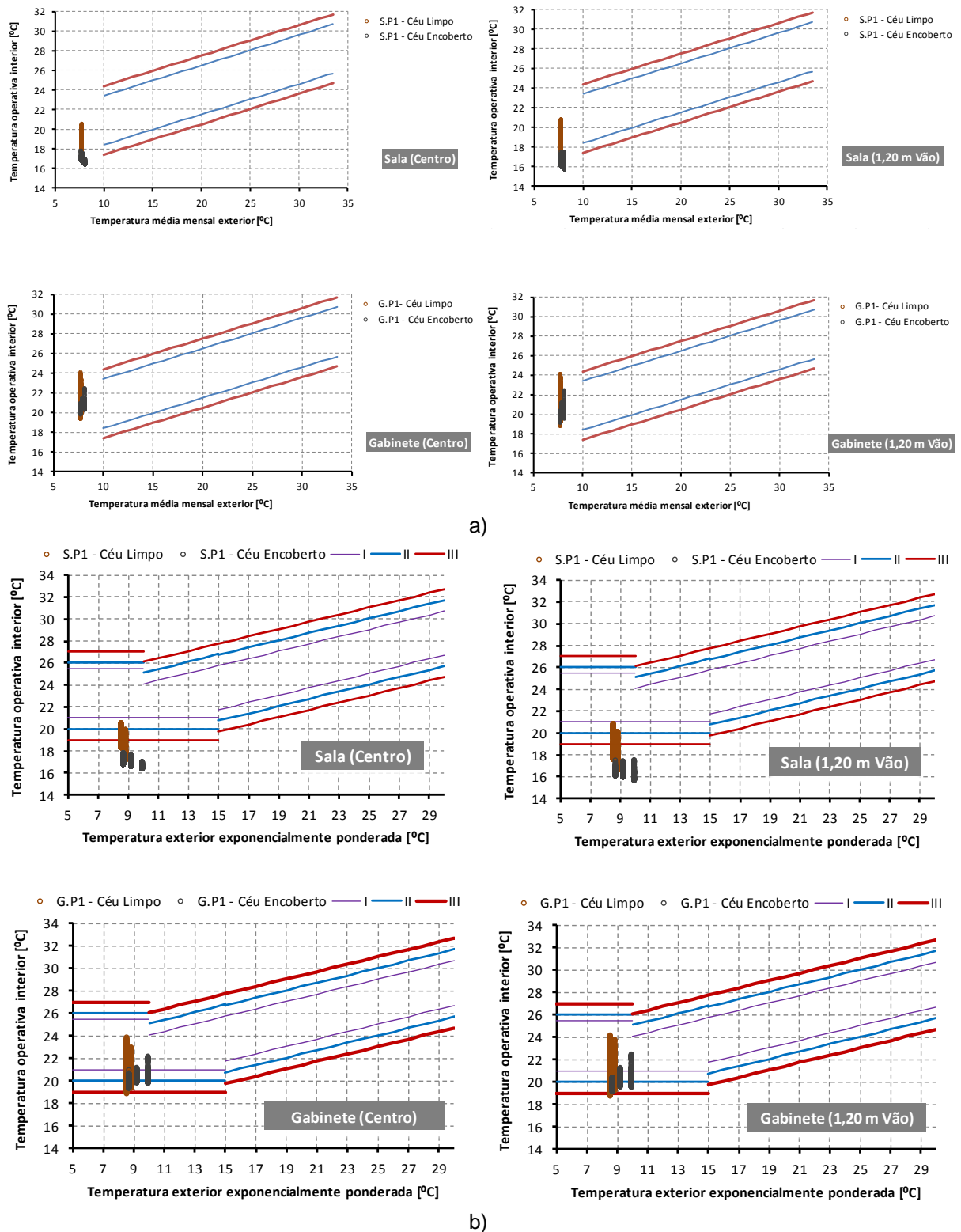


Fig.3.67. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Inverno (I) para o centro e a 120 m do vão: a) Céu limpo; b) Céu encoberto

Ao observar os resultados obtidos por aplicação dos modelos adaptativos da norma EN 15 251 e do LNEC durante a Campanha de Inverno (I), podemos concluir que:

- No geral, na sala de aulas, para a situação de céu limpo, grande parte dos resultados se encontram dentro da zona de conforto térmico tanto para o sistema de climatização ligado ou desligado, a 1,20 m do vão envidraçado apresentam uma grande dispersão chegando mesmo a verificar-se sobreaquecimento para algumas condições da envolvente, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos, sendo mais evidente a 1,20 m do vão envidraçado. Com céu encoberto, os resultados são semelhantes, mas com menor dispersão;
- Para a condição (I1 – estore 0% ativado e sistema de aquecimento desligado), para a situação de céu limpo, verifica-se que parte dos resultados estão fora da zona de conforto (temperatura baixas) no centro da sala de aulas, apresentando a 1,20 m do vão envidraçado resultados fora da zona de conforto com temperaturas baixas e temperaturas elevadas, no gabinete tanto no centro como a 1,20 m do vão envidraçado apresenta resultados fora da zona de conforto com temperaturas baixas e temperaturas elevadas. Com céu encoberto, em ambos os espaços os resultados são semelhantes, estando fora da zona de conforto com temperaturas baixas;
- Para a condição (I2 – estore 0% ativado, sistema de aquecimento ligado e ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mas a 1,20 m do vão envidraçado os resultados apresentam uma maior dispersão e estão fora da zona de conforto com temperaturas elevadas, verificando-se sobreaquecimento;
- Para a condição (I3 – estore 100% ativado com lâminas na vertical (0°), sistema de aquecimento ligado e ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos os casos e menor dispersão dos resultados a 1,20 m do vão envidraçado;
- Para a condição (I4 – estore 100% ativado com lâminas na horizontal (90°), sistema de aquecimento ligado e ocupação na sala de aulas) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos os casos e mas a dispersão dos resultados a 1,20 m do vão envidraçado é maior;
- Para a condição (I5 – estore 0% ativado e sistema de aquecimento ligado) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mas a 1,20 m do vão envidraçado os resultados apresentam uma maior dispersão e estão fora da zona de conforto com temperaturas elevadas, verificando-se sobreaquecimento;
- Para a condição (I6 – estore 100% ativado com lâminas inclinadas a 45° e sistema de aquecimento desligado) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos os espaços, mas a 1,20 m do vão envidraçado os resultados apresentam uma maior dispersão e estão fora da zona de conforto com temperaturas elevadas, verificando-se sobreaquecimento.

As figuras 3.68 e 3.69 mostram os resultados obtidos pela aplicação dos modelos adaptativos para a situação com os vãos com o estore 0% ativado durante a Campanha de Primavera (P1), para céu limpo e para céu encoberto, no centro e a 1,20 m do vão envidraçado, dos espaços em análise.





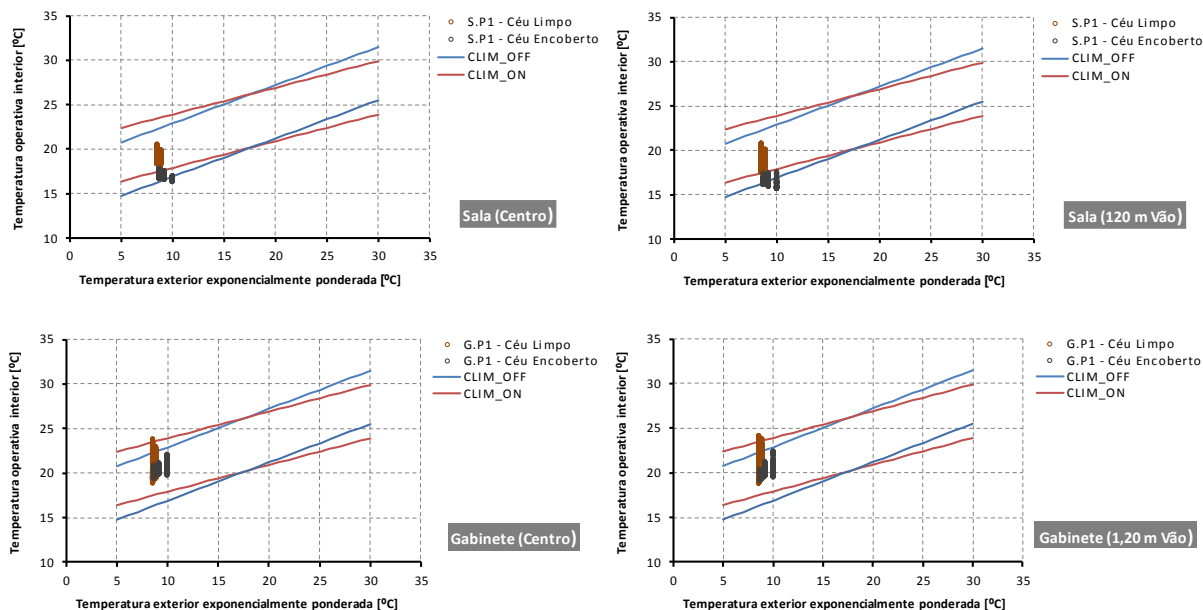


Fig.3.69. – Avaliação do conforto térmico por aplicação dos modelos adaptativos, durante a Campanha de Primavera (P1), para céu limpo: modelo do LNEC

Para complementar esta avaliação apresenta-se nas figuras 3.70 e 3.73 os resultados obtidos pela aplicação do modelo adaptativo da norma EN 15 251 e do LNEC para todas as condições da envolvente durante a Campanha de Primavera (P) para céu limpo, para o centro e a 1,20 m do vão envidraçado dos espaços em análise.

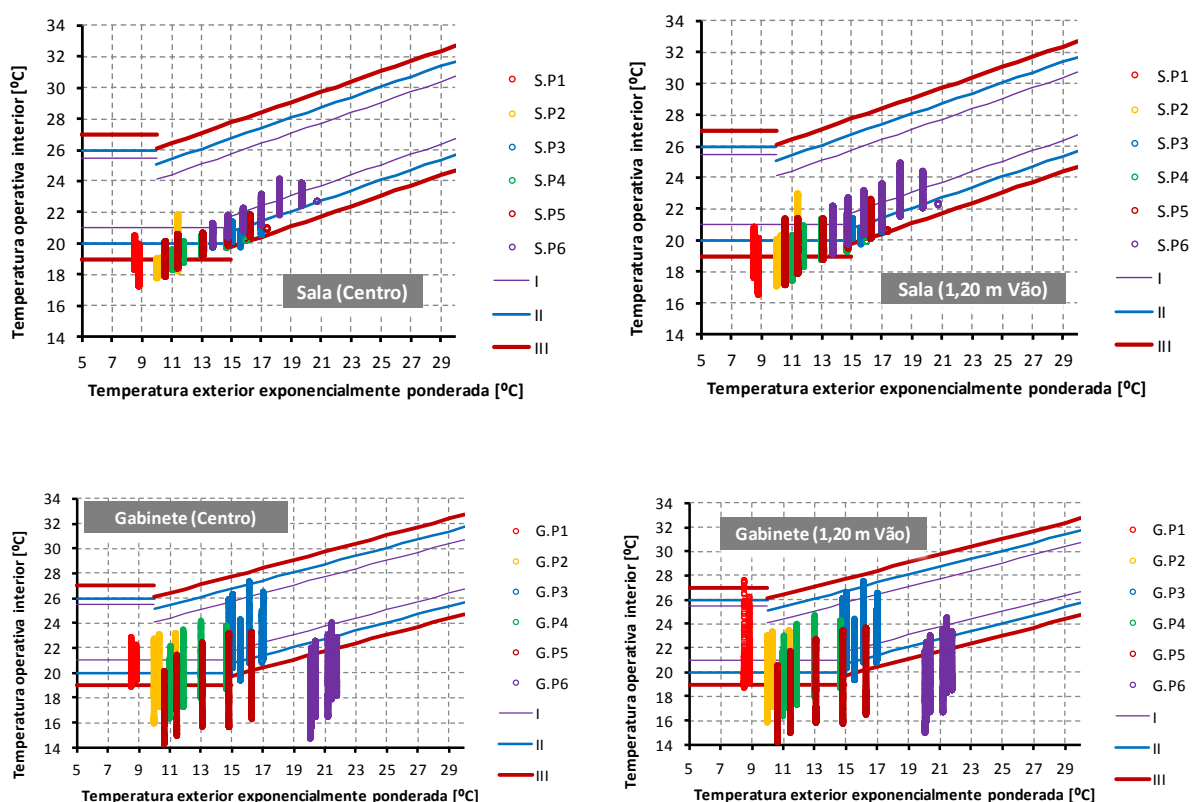


Fig.3.70. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pela EN 15 251 durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu limpo



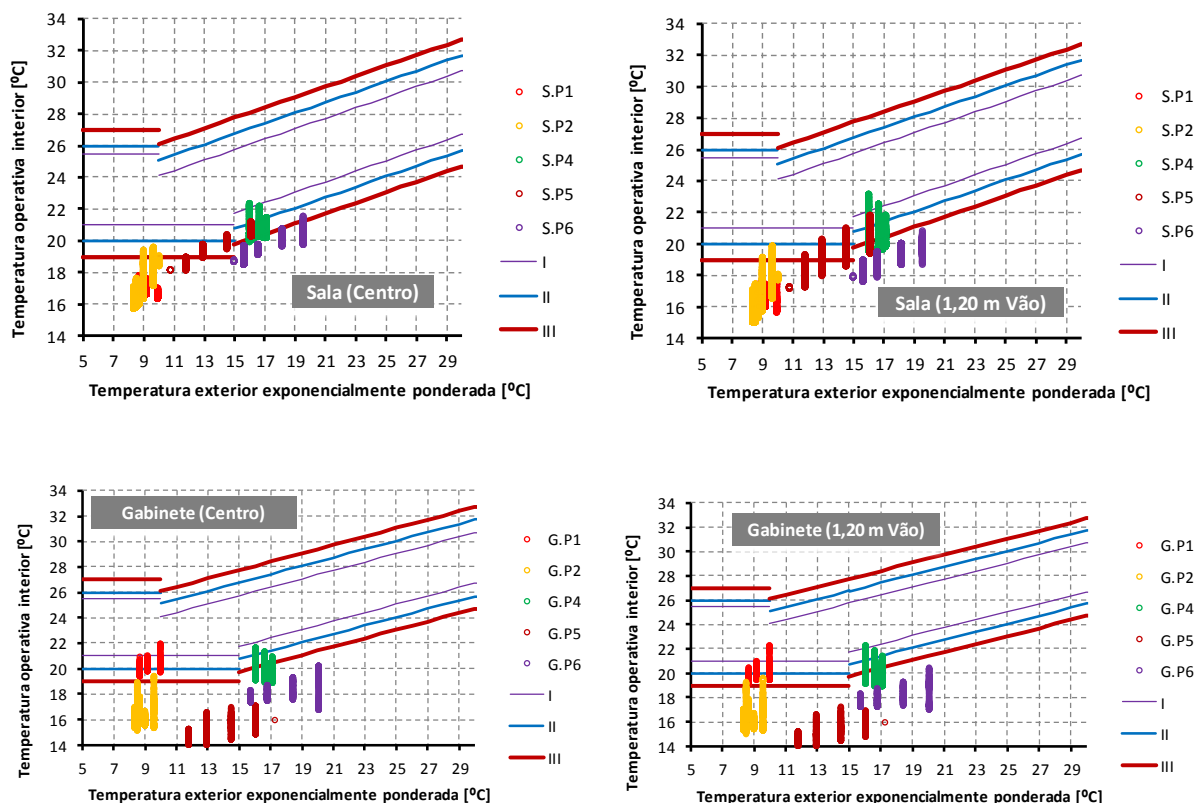


Fig.3.71. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pela EN 15 251 durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu encoberto

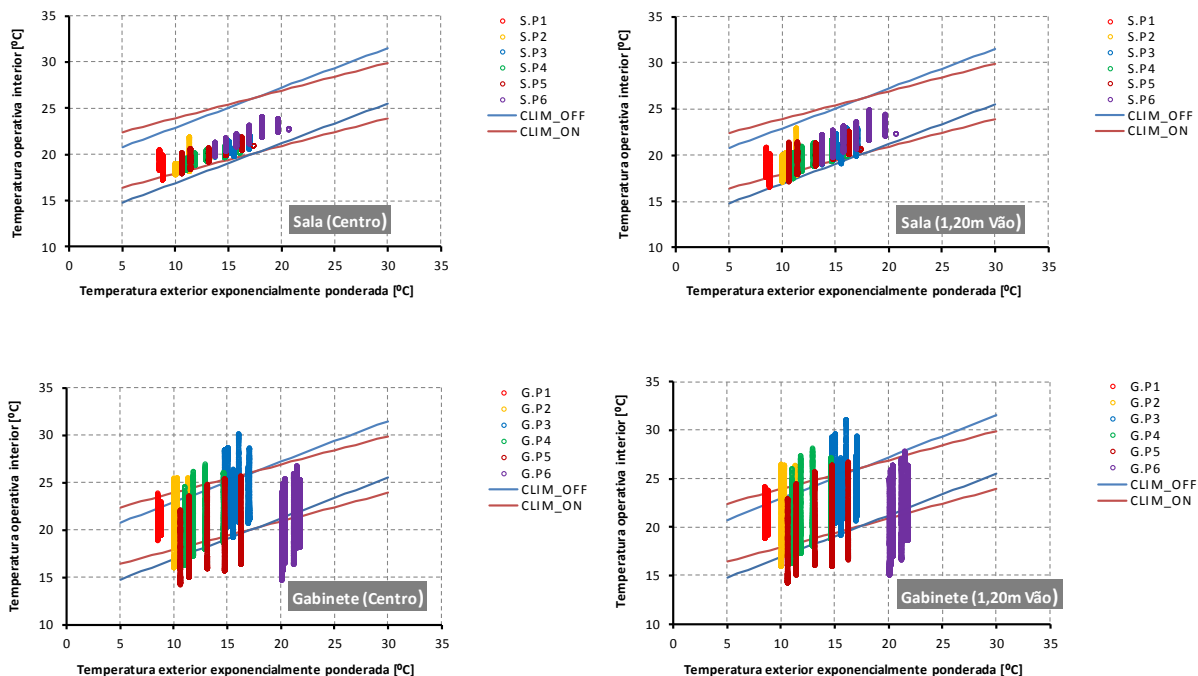


Fig.3.72. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu limpo

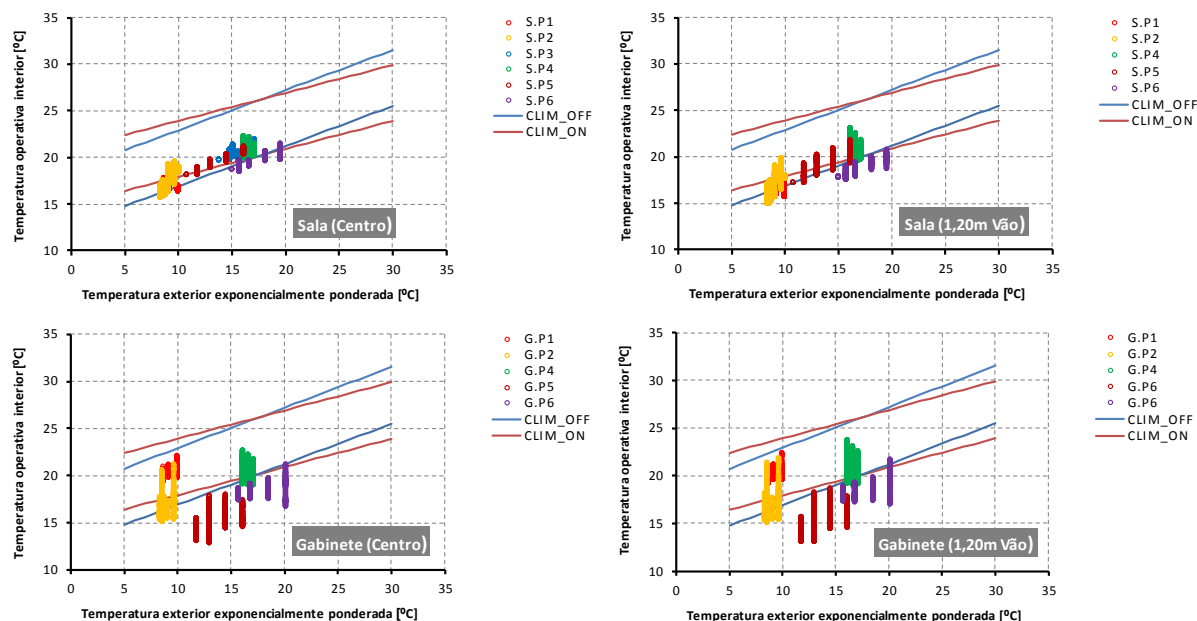


Fig.3.73. – Resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo proposto pelo LNEC durante a Campanha de Primavera (P) para o centro e a 120 m do vão, para Céu encoberto

Ao observar os resultados obtidos por aplicação do modelo adaptativo da norma EN 15 251 durante a Campanha de Primavera (P), podemos concluir que:

- No geral, que na sala de aulas, para a situação de céu limpo, boa parte dos resultados se encontram dentro da zona de conforto térmico, a 1,20 m do vão envidraçado apresentam maior dispersão melhorando as condições de conforto, já em relação ao gabinete os valores estão mais dispersos, sendo mais evidente a 1,20 m do vão envidraçado. Com céu encoberto, grande parte dos resultados estão fora da zona de conforto, mas com menor dispersão;
- Para a condição (P1 – estore 0% ativado e sistema de aquecimento ligado), para a situação de céu limpo, verifica-se que parte dos resultados estão fora da zona de conforto (temperatura baixas) no centro da sala de aulas, apresentando a 1,20 m do vão envidraçado maior dispersão dos, no gabinete tanto no centro como a 1,20 m do vão envidraçado apresenta maior dispersão resultados e mesmo fora da zona de conforto com temperaturas baixas e temperaturas elevadas. Com céu encoberto, na sala de aulas os resultados estão fora da zona de conforto (temperatura baixas) tanto no centro da sala de aulas como a 1,20 m do vão envidraçado, já no gabinete os resultados estão dentro da zona de conforto, classe III;
- Para a condição (P2 – estore 100% ativado com lâminas na horizontal (90°) e sistema de aquecimento desligado) verifica-se uma menor dispersão dos resultados, mas as condições de conforto térmico em ambos espaços pioraram. Com céu encoberto, em ambos os espaços os resultados estão fora da zona de conforto (temperatura baixas) tanto no centro da sala de aulas como a 1,20 m do vão envidraçado, sendo mais notório no gabinete;
- Para a condição (P3 – estore 100% ativado com lâminas na vertical (0°) e sistema de aquecimento desligado) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos os casos e menor dispersão dos resultados a 1,20 m do vão envidraçado. Com céu encoberto, em ambos os espaços não foram recolhidos dados para fazer esta análise;
- Para a condição (P4 – estore 100% ativado com lâminas inclinadas a 45° e sistema de aquecimento desligado) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos os casos mas a dispersão dos resultados a 1,20 m do vão envidraçado é maior;

- Para a condição (P5 – estore 0% ativado, sistema de aquecimento desligado e duas janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico em ambos espaços, mas a 1,20 m do vão envidraçado os resultados apresentam uma maior dispersão e estão fora da zona de conforto com temperaturas baixas;
- Para a condição (P6 – estore 100% ativado com lâminas na vertical (0°), sistema de aquecimento desligado e duas janelas oscilo-batente com o modo basculante aberto) verifica-se uma melhoria das condições de conforto térmico na sala de aulas, já no gabinete as condições são piores com temperaturas mais baixas.

### 3.5. CONCLUSÕES

A campanha experimental de monitorização de parâmetros higrotérmicos para avaliar o desempenho térmico e o conforto no centro de um compartimento nas zonas próximas dos vãos envidraçados (1,20 m envidraçado) relativa a dois espaços de um edifício de serviços, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, ESTGV, apresenta-se como um dos pontos principais deste trabalho e será a base para a concretização de um dos objetivos propostos para esta tese.

De fato, os resultados obtidos nas medições permitem retirar algumas ilações imediatas relativamente ao desempenho dos dispositivos de proteção, nomeadamente dos dispositivos de sombreamento, geometria dos espaços e da percentagem dos vãos envidraçados, dos espaços monitorizados. No entanto, tal análise deve ser cuidada e devidamente enquadrada face às limitações inerentes à metodologia utilizada, nomeadamente:

- O espaço temporal em que foram realizadas as medições é limitado e corresponde a condições climáticas exteriores específicas que podem ser consideradas como representativas apenas de um determinado período de medição. Qualquer extrapolação para o desempenho desse espaço num período diferente pode ser abusiva. Como algumas das medições para as mesmas condições da envolvente foram realizados em períodos diferentes, não permitindo a comparação do desempenho entre os espaços, tendo isso em consideração, fez-se uma análise tendo em consideração a variação da diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura do ar exterior, como se pode verificar pela figura 3.49, ao comparar os resultados obtidos para a sala de aulas, por aplicação do método gráfico simplificado durante a campanha de verão para dois períodos de medição com as mesmas condições (vãos com o estore 0% ativado S.V1 e S.V6), mas em períodos de tempo diferentes;
- A amostra escolhida não permite uma caracterização completa do desempenho dos vãos envidraçados. Não é possível avaliar o efeito da orientação dos vãos no seu desempenho, nos espaços monitorizados os vãos têm a mesma orientação.

As campanhas experimentais tinham objetivos bem definidos e que foram, no essencial, cumpridos. Assim, do estudo efetuado é possível tirar as seguintes conclusões:

- 1) Avaliar as condições de conforto térmico no centro dos espaços e nas zonas próximas dos vãos envidraçados:
  - Foi possível verificar que a temperatura do ar interior nas zonas mais próximas dos vãos envidraçados é superior à temperatura registada no centro dos espaços durante o verão, já durante a estação de aquecimento, com o sistema de aquecimento desligado, tal só se verifica, quando a radiação solar incide diretamente no interior do espaço;

- A incidência da radiação direta nas pessoas que têm o seu posto de trabalho nas zonas próximas dos vãos envidraçados, pode provocar sensações de desconforto, principalmente quando a trajetória do Sol é mais baixa;

2) Aferir sobre a aplicação dos modelos de conforto térmico adotados:

- Os índices PMV e PPD permitem avaliar as condições de conforto tanto no centro dos espaços como nas zonas próximas dos vãos envidraçados, sendo sensível à variação da temperatura média radiante e à temperatura do ar, na zona em estudo, por outro lado a escala de sete níveis permite uma classificação quantitativa mais objetiva das condições de conforto da zona em estudo;
- Comparando os índices PMV e PPD com o método gráfico simplificado, para o presente estudo, podemos concluir que o resultado da análise às condições de conforto térmico foi muito semelhante, realçando o facto do método simplificado poder ser utilizado sem recurso a grandes meios para a medição e caracterização das condições de conforto de um espaço interior;
- Em relação à aplicação do método gráfico simplificado, em termos globais podemos concluir que com a análise dos resultados obtidos podemos chegar às mesmas condições de conforto térmico obtidas com os índices PMV e PPD, mas tem limitações em relação à quantificação das condições de conforto, uma vez que as zonas de conforto do método gráfico simplificado foram definidas admitindo que 80% dos ocupantes estão satisfeitos com o ambiente térmico do espaço, este limite, corresponde às condições aceitáveis de conforto térmico definidas para os índices PMV (-0,5 a +0,5) e PPD (<10%).
- Os modelos adaptativos só podem ser aplicados em condições muito específicas, nomeadamente: de temperaturas médias mensais exteriores; níveis de atividade dos ocupantes; velocidade do ar interior. O Modelo da ASHRAE só se pode aplicar durante a estação de aquecimento. Os limites definidos para cada um dos modelos também têm por base os índices PMV e PPD;
- Ao compararmos os resultados obtidos pelos diferentes modelos, podemos realçar o facto dos modelos adaptativos permitirem uma maior tolerância, sempre que possível, em relação as sensações de conforto sentidas pelos ocupantes dos espaços;
- Em termos globais, podemos referir que o método gráfico simplificado e o modelo adaptativo proposto pelo LNEC representam com muita fiabilidade as condições de conforto térmico interior. Por outro lado, podemos utilizar, nestes modelos, os registos da temperatura do ar interior, visto que existe uma correlação muito elevada entre essa e a temperatura operativa. Para caraterizar o conforto térmico interior, com alguma fiabilidade não será necessário utilizar equipamentos de medição muito complexos e sofisticados (estações microclimáticas), bastando apenas sondas de temperatura, humidade relativa e velocidade do ar;
- Podemos então concluir que a utilização dos índices PMV e PPD permitem avaliar as condições de conforto tanto no centro dos espaços como nas zonas próximas dos vãos envidraçados, com muito rigor;
- Em relação aos modelos adaptativos, o modelo proposto pelo LNEC será o recomendado, uma vez que na sua elaboração teve em conta o clima português.

3) Avaliar o efeito da utilização de dispositivos de sombreamento:

- Ao compararmos os resultados obtidos durante a campanha de verão, a sala de aulas com uma pala horizontal, e o gabinete sem qualquer tipo de sombreamento, podemos concluir que a utilização dos dispositivos de sombreamento horizontais para o verão, para esta orientação dos vãos envidraçados, são de extrema importância;
- Também podemos observar que a utilização de dispositivos verticais de sombreamento, tanto à esquerda como à direita do vão envidraçado, poderia evitar algumas situações de desconforto, devido à incidência direta da radiação solar, quando a trajetória do Sol é mais baixa;
- Na sala de aulas existe uma pala horizontal com 1,00 m de profundidade, podemos verificar que durante a campanha de verão, sendo a trajetória do Sol mais elevada, na sala de aulas os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, sendo que a 1,20 m do vão envidraçado os ocupantes têm uma sensação de calor ligeiramente superior. Já os valores registados a 1,20 m do vão envidraçado no gabinete, sem dispositivo de sombreamento, são muito superiores aos registados na sala de aulas;
- Podemos ainda verificar que na sala de aulas os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, estando muitos valores dentro da zona de conforto para o verão, sendo que a 1,20 m do vão envidraçado os ocupantes têm uma sensação de calor ligeiramente superior. No centro do gabinete, sem dispositivo de sombreamento, a maior parte dos valores registados estão fora da zona de conforto, a 1,20 m do vão envidraçado todos os valores registados estão fora da zona de conforto de verão.

4) Avaliar o efeito da utilização de dispositivos de proteção solar:

- Ao compararmos os resultados obtidos durante a campanha de verão, podemos concluir que a utilização dos dispositivos de proteção solar para o verão, para esta orientação dos vãos envidraçados, são de extrema importância;
- Durante a campanha de inverno (com estore 0% ativado e sem aquecimento ambiente), os resultados obtidos foram muito semelhantes quando a radiação solar é irregular (céu encoberto), embora com temperaturas operativas mais elevadas a 1,20 m do vão. Já quando existe radiação solar (céu limpo) podemos observar uma melhoria das condições de conforto no centro dos espaços, no gabinete, em ambos os espaços a 1,20 m do vão, as condições de conforto são maiores, mas também se obtêm condições de desconforto por excesso de calor.

5) Avaliar o efeito da abertura dos vãos envidraçados e circulação do ar no interior dos espaços:

- Ao compararmos os resultados obtidos durante a campanha de verão, podemos concluir que a abertura dos vãos envidraçados e circulação do ar no interior dos espaços no verão, podemos observar uma melhoria das condições de conforto no centro dos espaços em ambos os espaços, a 1,20 m do vão podemos obter condições de desconforto por excesso de calor, devido à entrada de calor nas horas mais quentes;
- Ao compararmos os resultados obtidos durante a campanha de primavera, podemos concluir que a abertura dos vãos envidraçados dos espaços na primavera, podemos observar uma melhoria das condições de conforto no centro da sala de aulas, a 1,20 m do vão podemos obter condições de desconforto devido à entrada de ar mais frio. No gabinete, todos os valores registados estão fora da zona de conforto, tanto no centro do espaço como a 1,20 m do vão, devendo-se à entrada de ar mais frio.

6) Aferir sobre o efeito da radiação solar no interior dos espaços:

- A incidência da radiação solar no interior dos espaços é negativa nos dias quentes, do verão, do início do outono e do fim da primavera, mas durante o resto do ano é positivo, chegando mesmo a garantir algumas horas de conforto no interior dos espaços mesmo durante o inverno;
- Foi possível verificar que a temperatura do ar interior nas zonas mais próximas dos vãos envidraçados é superior à temperatura registada no centro dos espaços durante o verão, já durante a estação de aquecimento, com o sistema de aquecimento desligado, tal só se verifica, quando a radiação solar incide diretamente no interior do espaço;
- Durante a campanha de outono (com estore 0% ativado e sem aquecimento ambiente), quando a radiação solar é irregular (céu encoberto) os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, estando os valores médios obtidos próximos das condições aceitáveis de conforto térmico definidas para os índices PMV (-0,5 a +0,5) e PPD (<10%). Quando a radiação solar é regular (céu limpo) os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram um pouco diferentes, em termos médios, a 1,20 m do vão envidraçado os ocupantes têm uma sensação de calor superior, chegando mesmo a ter uma sensação de muito calor;
- Durante a campanha de inverno (com estore 0% ativado e sem aquecimento ambiente), quando a radiação solar é irregular (céu encoberto) os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, estando todos valores registados fora da zona de conforto de inverno. Quando a radiação solar é regular (céu limpo) os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito diferentes. Em relação à sala de aulas, no centro todos os valores estão fora da zona de conforto de inverno, a 1,20 m do vão envidraçado valores chegam a estar fora da zona de conforto de verão, chegando ter uma sensação de muito calor. Em relação ao gabinete no centro existem valores dentro da zona de conforto de inverno, a 1,20 m do vão envidraçado valores chegam a estar fora da zona de conforto de verão, chegando ter uma sensação de muito calor;
- Durante a campanha de primavera (com estore 0% ativado e sem aquecimento ambiente), quando a radiação solar é regular (céu limpo) e é irregular (céu encoberto) os resultados obtidos no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, estando os valores obtidos dentro das condições aceitáveis de conforto térmico definidas para os índices PMV (-0,5 a +0,5) e PPD (<10%).

7) Aferir sobre o efeito da geometria dos espaços e a percentagem dos vãos envidraçados:

- Ao compararmos os resultados obtidos, a sala de aulas com maior profundidade, com mais superfície absorvente (maior inércia) e o gabinete em que a maior dimensão corresponde à parede da fachada e pouca profundidade, podemos verificar uma diferença de temperatura superior, entre o centro e as zonas próximas dos vãos, e maior efeito da incidência da radiação solar no gabinete. Na sala de aulas a diferença de temperatura entre o centro e as zonas próximas dos vãos é menor;
- Ao observamos os resultados obtidos para o gabinete, em que a área envidraçada corresponde a 35% da área do pavimento, durante a estação de aquecimento, nos dias de céu limpo, é possível obter condições de conforto.

# 4

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### 4.1. INTRODUÇÃO

O segundo grande objetivo desta Tese passa por propor um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados tendo como pressupostos a melhoria do desempenho térmico da envolvente e do conforto térmico interior dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, sem e com climatização (aquecimento e arrefecimento) e, desta forma, melhorar também a sua eficiência energética.

Para tal é necessário recorrer a um procedimento de otimização de soluções construtivas tipo, relativas à conceção dos vãos envidraçados, a aplicar em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, de forma a minimizar o desconforto térmico interior. Para tal serão utilizadas ferramentas computacionais de simulação e otimização.

Para apresentar a otimização do desempenho térmico e do conforto no interior do edifício, foi criado um modelo de um edifício com três pisos, constituído por diferentes espaços, com diferentes condições de envolvente (área da fachada, área do vão envidraçado, tipo de envolvente, profundidade, cor da fachada, tipo de caixilho e de vidro, utilização de diferentes sistemas de proteção solar e de sombreamento por elementos exteriores, espessura de isolamento térmico, tipo de inércia térmica, e ventilação natural), para diferentes orientações da fachada e diferentes localizações, cuja geometria corresponde a situações construtivas correntes. Como se pretende analisar o desempenho térmico dos espaços e as condições de conforto térmico interior, principalmente, em função das características dos vãos envidraçados, para determinado tipo de exposição exterior, considerou-se como adiabáticas todas as envolventes interiores, anulando desta forma as trocas de calor entre zonas (espaços) do mesmo edifício.

Posteriormente faz-se uma análise de sensibilidade, onde serão apresentados e analisados alguns dos resultados obtidos nas simulações e alguns resultados obtidos após a aplicação de funções de avaliação do desempenho adiante definidas.

### 4.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo passa por apresentar o modelo de um edifício para simular, recorrendo a uma ferramenta de simulação dinâmica multi-zona, para os mais variados cenários, e posteriormente comparar soluções para os vãos envidraçados, tendo como pressupostos a melhoria do desempenho térmico e do conforto térmico no interior dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços,

sem e com climatização (aquecimento e arrefecimento) e, desta forma, melhorar também a sua eficiência energética.

O primeiro passo para a formulação da otimização do desempenho térmico e do conforto no interior do edifício implica a definição dos seguintes parâmetros:

- Escolha do modelo de edifício: pretende-se criar um modelo simplificado cuja geometria corresponda a situações construtivas correntes para edifícios de habitação e de serviços, tendo em consideração, a localização geográfica do edifício, a área e orientação da fachada, o tipo de envolvente, área e características dos vãos envidraçados;
- As variáveis: correspondem às propriedades e características dos vãos envidraçados que mais condicionam o seu desempenho e cujo valor se pretende otimizar;
- As funções de avaliação do desempenho: trata-se da definição de critérios para desempenho do edifício em função das variáveis em estudo. Pode recorrer-se a funções matemáticas ou definir limites de acordo com normas e regulamentação. O seu cálculo implica o recurso a ferramentas de simulação dinâmica do desempenho anual do edifício.

As soluções ótimas do problema correspondem ao conjunto de variáveis que otimizam as funções de avaliação do desempenho. A minimização ou maximização das funções só será conseguida com recurso a programas de otimização, a apresentar no capítulo 5.

Face aos objetivos definidos para este trabalho optou-se, como ferramenta a utilizar para a modelação e simulação computacional do desempenho dos edifícios, o programa *EnergyPlus* [10] e o programa *DesignBuilder* [11], como interface gráfica do programa *EnergyPlus*.

O programa de simulação escolhido foi o *EnergyPlus* [10] pois possui todas as potencialidades requeridas para este trabalho, tem um bom suporte bibliográfico de apoio à sua utilização e o seu modelo de cálculo encontra-se perfeitamente validado. A principal desvantagem desta ferramenta, de simulação multi-zona, prende-se com a dificuldade de introdução dos dados, uma vez que não dispõe de interface gráfica para esse fim. Neste trabalho foi utilizado o programa *DesignBuilder* [11], como interface do *EnergyPlus*, para apoio na criação dos modelos a simular.

### **4.3. DESCRIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS MODELOS DE EDIFÍCIOS**

#### **4.3.1. MODELOS DA ESTGV**

##### **4.3.1.1. Introdução**

As simulações apresentadas neste ponto destinaram-se à validação do programa de simulação escolhido, para este tipo de modelos de edifícios, e da sua utilização por comparação com os valores medidos.

##### **4.3.1.2. Geometria**

A modelação dos dois edifícios onde as medições experimentais tiveram lugar iniciou-se com a criação da sua geometria. Para tal, foram consultados os projetos originais dos edifícios, construídos nos anos 90, onde estão localizados os espaços, a sala de aulas encontra-se no edifício pedagógico e o gabinete encontra-se no pavilhão oficial Gabriel Afonso. Os projetos originais dos edifícios incluem a caracterização detalhada de todos os elementos construtivos que constituem a sua envolvente atual, uma vez que ainda não foram sujeitos a nenhuma intervenção de reabilitação.



A figura 4.1 mostra a geometria do modelo criado para o edifício pedagógico e pavilhão oficial.



Fig.4.1. – Modelo criado para o edifício pedagógico e pavilhão oficial

A simulação numérica, quando realizada para períodos extensos e em modelos complexos, é um processo computacional muito exigente e, naturalmente, bastante demorado. Logo, modelos detalhados dos edifícios completos aumentariam de tal forma o tempo de simulação que seria impraticável. Por outro lado, os próprios programas definem o número máximo de zonas que podem ser consideradas. Para ultrapassar esse problema foram criados dois modelos, um do pavilhão oficial e outro com parte do edifício pedagógico, considerando apenas as zonas próximas da zona monitorizada que pode ser considerado representativo do desempenho do edifício.

A figura 4.2 mostra a geometria do modelo criado para o edifício pedagógico. A figura 4.3 mostra a geometria do modelo criado para o pavilhão oficial.

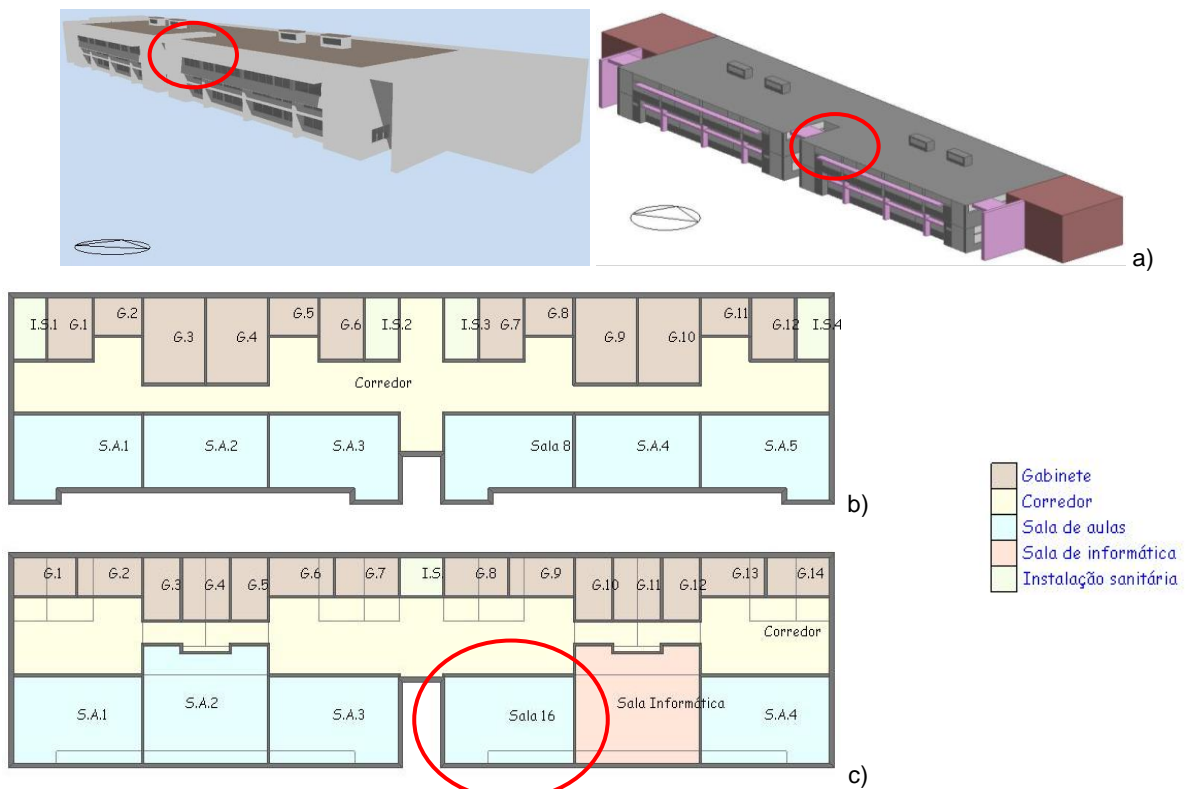


Fig.4.2. – Modelo criado para o edifício pedagógico: a) vista exterior; b) planta do 1.º piso; c) planta do 2.º piso

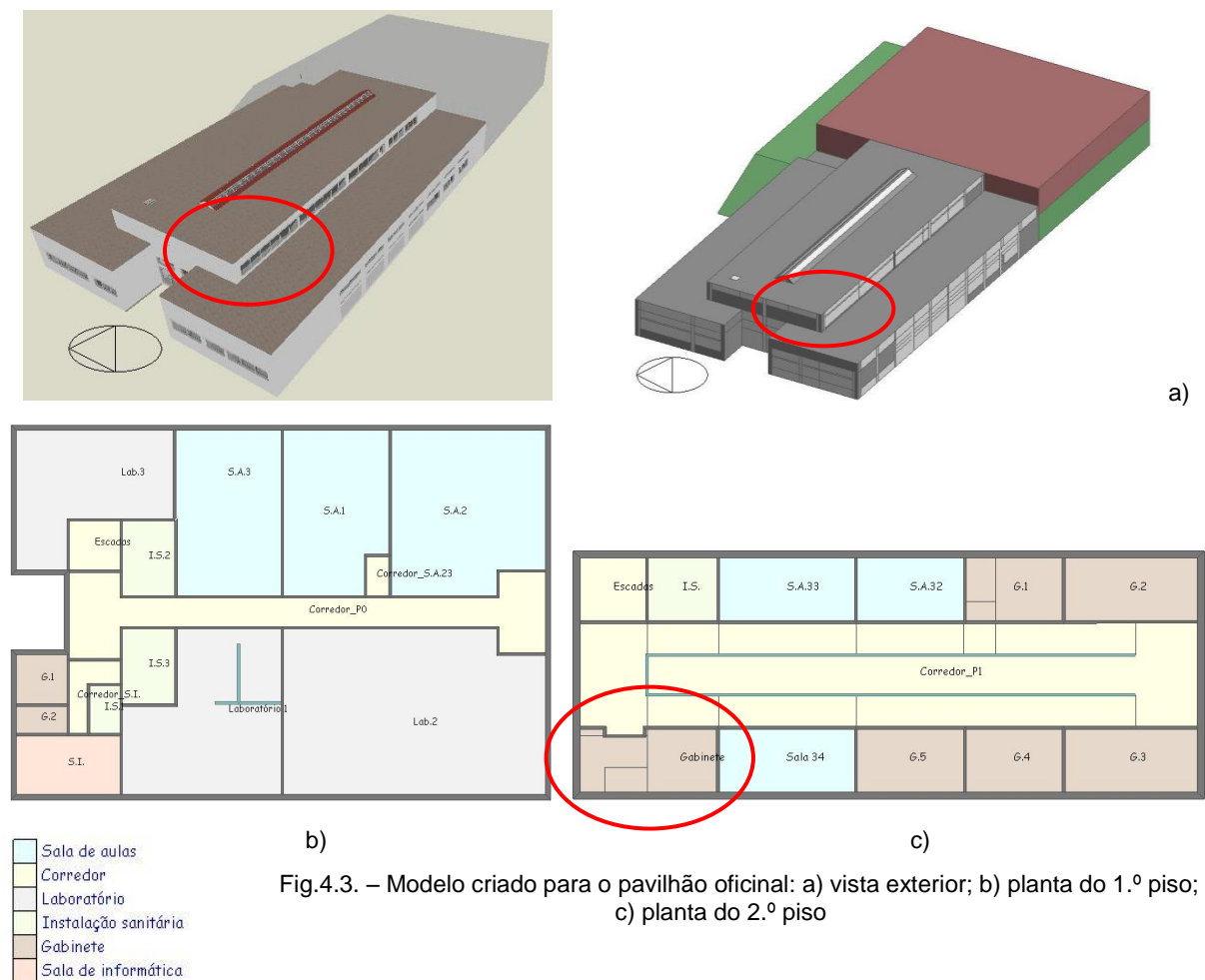


Fig.4.3. – Modelo criado para o pavilhão oficial: a) vista exterior; b) planta do 1.º piso; c) planta do 2.º piso

#### 4.3.1.3. Elementos Construtivos

A modelação dos elementos construtivos foi pormenorizada, tendo-se caracterizado em detalhe cada propriedade dos materiais que os constituem.

Como já foi anteriormente referido, o programa *DesignBuilder* [11] disponibiliza, em livraria própria, materiais e soluções construtivas tipo. Mas, grande parte das soluções construtivas disponíveis não são soluções correntes em Portugal, pelo que se teve de efetuar um trabalho minucioso de criação de novas soluções construtivas específicas utilizadas nos edifícios em estudo.

As soluções construtivas de paredes, pavimentos, coberturas e vãos envidraçados, utilizadas nos dois edifícios são iguais, por isso, foi criado um único elemento comum aos dois modelos.

A envolvente opaca foi detalhadamente caracterizada no anexo B de acordo com o §3.3.2.1 e os vãos envidraçados no §3.3.2.2.

#### 4.3.1.4. Ganhos Internos

Os ganhos internos são uma componente fundamental do balanço térmico dos edifícios pelo que a sua correta contabilização é essencial para se obter um modelo com a fiabilidade necessária, tendo também em consideração os períodos de ocupação (nível de ocupação e respetivos ganhos internos devido ao metabolismo).

Os ganhos internos incluem as seguintes parcelas:

- Atividade metabólica (ocupação);
- Iluminação;
- Equipamento.

Para conceber os perfis diários de ocupação tipo para cada um dos espaços considerados no modelo, foi consultado o calendário escolar e o horário de cada sala de aulas e uma taxa média de ocupação, o que devido à grande variabilidade no horário de funcionamento dos espaços nos edifícios escolares, não foi uma tarefa fácil. Adicionalmente, foi definida a densidade de ocupação e a respetiva atividade metabólica para esses espaços, tomando por base os valores de referência sugeridos pelas normas, EN ISO 7 730 [40], EN 15 251 [46] e ASHRAE 62.1 [131].

O REH [8] também inclui a contabilização dos ganhos internos médios (ocupação, iluminação e equipamentos), variando entre  $4 \text{ W/m}^2$  e  $7 \text{ W/m}^2$ , para serem utilizados no cálculo das necessidades energéticas para os edifícios de serviços. Porém, considerou-se que a utilização de um valor único seria demasiado simplista para aplicar nos modelos em estudo.

A atividade metabólica foi definida a partir das normas ISO 7 730 [40] e ASHRAE 55 [37] que disponibilizam uma base de dados de valores de produção calorífica do corpo humano em função da atividade que está a ser desenvolvida.

O quadro 4.1 apresenta uma síntese dos dados adotados na modelação da atividade metabólica nos diferentes espaços considerados nos modelos. A superfície do corpo de uma pessoa de tamanho médio que é considerado no programa *DesignBuilder* [11] é de  $1,80 \text{ m}^2$ .

Quadro 4.1. – Dados para a contabilização da atividade metabólica

Espaço	Metabolismo [W/ocupante]	Densidade [ocupantes/m <sup>2</sup> ]	Perfil de Ocupação
Sala de aulas <sup>(1)</sup>	94	0,13	8H00 às 13H00 - 14H00 às 18H00
Sala de aulas	94	0,40	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Sala informática	94	0,40	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Laboratório	112	0,40	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Gabinete	94	0,15	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Gabinete <sup>(1) (2)</sup>	-	-	-
Corredor	112	0,60	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Instalações Sanitárias	112	0,20	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00

(1) Espaços monitorizados

(2) Sem ocupação

A carga térmica relativa à iluminação foi definida em função dos valores recomendados na bibliografia. De acordo com o RECS [8] o máximo de densidade de potencia de iluminação, DPI, estipulados a instalar em salas de aula, salas de trabalho de apoio, laboratórios é de  $(2,8 \text{ W/m}^2)/100 \text{ lux}$ , e de acordo com a norma EN 12464-1 [132], uma iluminação mínima de 500 lux. A norma ASHRAE 90.1 de 2007 [133] propõe  $15 \text{ W/m}^2$  para salas de aula convencionais.

Neste trabalho optou-se por considerar a existência de carga térmica devido à iluminação apenas nas salas de aulas, laboratórios e corredores, com um valor máximo de  $15 \text{ W/m}^2$  e variável de acordo com o perfil diário apresentado na figura 4.4, apenas durante o período letivo.

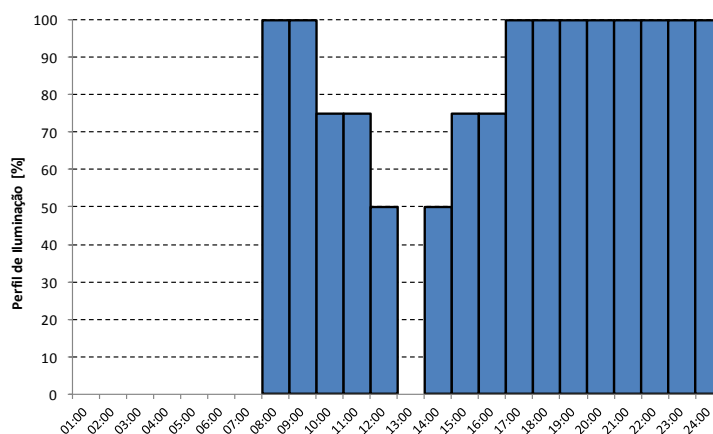


Fig.4.4. – Perfil de funcionamento da iluminação

O quadro 4.2 apresenta uma síntese dos dados considerados para os ganhos internos médios adotados na modelação do equipamento nos diferentes espaços considerados nos modelos, bem como o perfil de operação. Os valores foram obtidos em função das características médias dos equipamentos e em função das áreas em que se encontravam, nomeadamente:

- Sala de aulas e sala de informática (equipamento informático e audio-visual);
- Laboratório (equipamento informático, audio-visual e equipamento específico);
- Gabinetes (equipamento informático).

Quadro 4.2. – Dados para a contabilização dos ganhos internos devidos aos equipamentos

Espaço	Computador [W/m <sup>2</sup> ]	Outros Equipamentos [W/m <sup>2</sup> ]	Perfil de Operação
Sala de aulas <sup>(1)</sup>	1,5	3,5	8H00 às 13H00 - 14H00 às 18H00
Sala de Informática	10	1,5	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Laboratório	1,5	1,5	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Gabinete	4,0	0	8H00 às 13H00 - 14H00 às 24H00
Gabinete <sup>(1) (2)</sup>	-	-	-

(1) Espaços monitorizados

(2) Sem equipamento

Todos os ganhos internos referidos anteriormente foram considerados de segunda a sexta e no sábado até às 13:00, exceto período de férias. Foram considerados três períodos de férias: duas semanas no Natal, uma semana na Páscoa e um mês no verão (agosto). Foram também considerados três períodos de exames, nos quais se reduziram os ganhos relacionados com a ocupação das salas de aulas (convencionais e de informática) e dos laboratórios: seis semanas no inverno (janeiro e início de fevereiro), oito semanas no verão (junho, início de julho e início de setembro).

#### 4.3.1.5. Sistemas de Aquecimento e Ventilação

Os edifícios onde estão localizados os dois espaços monitorizados no âmbito da campanha experimental descrita no capítulo 3 e que servem de base aos modelos a simular aqui descritos dispõem de sistema de aquecimento e sistema de ventilação nas salas de aulas, que não foi ligado durante toda a campanha experimental. O sistema de aquecimento é central, a gás natural, com circulação de água quente, no quadro 4.3 é apresentado o perfil de funcionamento do sistema de aquecimento entre 12 de novembro e 05 de abril.

Quadro 4.3. Programação do aquecimento central

Período	Ligado (L)
Dias úteis	08:00 – 12:30 e 13:50 – 24:00
Sábados	08:00 – 13:00
Domingos e Feriados	-

Foi considerado um valor constante de admissão de ar novo nos espaços considerados nos modelos.

Para a validação da simulação, através da comparação com os dados registados nas medições, foi considerada a situação que mais se assemelha com a real, ou seja, quando o sistema de aquecimento estava ligado considerou-se uma temperatura do ar interior mínima de 18 °C e um caudal de ventilação definido em função dos resultados obtidos nas medições, através Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive, descritas no ponto §3.4.5. O valor adotado foi de 0,12 h<sup>-1</sup> para a sala de aulas, 0,05 h<sup>-1</sup> para o gabinete e de 0,20 h<sup>-1</sup> para os outros espaços considerados nos modelos.

#### 4.3.1.6. Dados Climáticos

Para o presente trabalho foi criado um ficheiro climático anual em tempo real, utilizando a “*Weather Statistics and Conversion*” uma ferramenta disponibilizada pelo programa *EnergyPlus* [10] com os registos horários das seguintes variáveis meteorológicas, medidas no local:

- Temperatura exterior [°C];
- Humidade relativa exterior [%];
- Temperatura de ponto de orvalho exterior [°C];
- Pressão Atmosférica [Pa];
- Intensidade da radiação global em superfície horizontal [ $\text{W/m}^2$ ];
- Velocidade e direção do vento.

Para a elaboração do ficheiro climático, com os dados meteorológicos medidos, é ainda necessário calcular alguns dados em falta, a partir da Intensidade da Radiação Global Horizontal ( $I_{gh}$ ), medida, que representa a radiação solar total que atinge uma superfície horizontal sendo igual a soma da radiação direta, da radiação difusa e da radiação refletida:

- Intensidade da Radiação Solar Difusa Horizontal ( $I_{dh}$ ) - luz solar recebida indiretamente, resultante da ação da difração nas nuvens, nevoeiro, poeiras em suspensão e outros obstáculos na atmosfera;
- Intensidade da Radiação Solar Direta em Superfície Normal ( $I_i$ ) - luz solar recebida diretamente na superfície normal aos raios solares.

Para a determinação da Radiação Solar Difusa Horizontal, considera-se primeiramente a radiação emitida pelo sol e recebida na parte exterior da atmosfera, numa área unitária perpendicular à direção de propagação da radiação. Apesar da existência de algumas variações, esta designa-se por “constante solar”. Apesar de não ser exatamente constante, o valor da intensidade solar no limite da atmosfera terrestre, tem sido motivo de vários estudos desenvolvidos visando a determinação do valor da constante solar, baseando-se em medições efetuadas na terra e no espaço. Atualmente podemos encontrar os seguintes valores atribuídos à constante solar ( $I_{cs}$ , em  $\text{W/m}^2$ ): 1350  $\text{W/m}^2$ ; 1353  $\text{W/m}^2$ ; 1366  $\text{W/m}^2$ ; 1367  $\text{W/m}^2$ ; 1368  $\text{W/m}^2$  e 1373  $\text{W/m}^2$  [83]. Uma vez que a órbita terrestre é ligeiramente elíptica, a distância da terra ao sol não é constante, pelo que a radiação solar extraterrestre varia desde 1328  $\text{W/m}^2$  a 06 de junho até 1417  $\text{W/m}^2$  a 03 de janeiro [17].

O padrão da distribuição da insolação é alterado sobre a superfície terrestre devido principalmente ao efeito da atmosfera, que absorve, reflete, difunde e re-irradia a energia solar. A radiação que, por fim, consegue atingir o solo, num determinado ponto da superfície terrestre (radiação global) pode ser composta por duas componentes: radiação direta, que é a que vem diretamente do sol e radiação difusa, que é a resultante da difusão da radiação solar pela matéria da atmosfera. São dados relativos a essas duas formas de radiação que se necessita conhecer quando se pretende aproveitar a energia solar. O valor destas duas componentes, em regra, não está disponível, sendo necessário calcular-se a partir do conhecimento da radiação global e da radiação difusa em superfície horizontal que habitualmente se encontra registada em diversas estações de medição. No nosso caso apenas medimos os valores da radiação global em superfície horizontal, nestas circunstâncias não será possível calcular com rigor o valor das componentes da radiação direta e difusa na superfície terrestre, podendo esta ser utilizada para estimar a quantidade de radiação direta e difusa que compõe aquele valor, numa forma estatística [90].

O procedimento empírico envolve uma correlação entre a proporção de radiação difusa ( $k_d$ ), ou seja, a razão entre a radiação difusa e a radiação global que chega a uma determinada área, e o índice de claridade ( $k_t$ ). Este índice corresponde à relação da radiação global horizontal medida e a radiação correspondente no topo da atmosfera terrestre calculada a partir da constante solar. Portanto, quanto maior for o índice de claridade, maior será a parcela da radiação extraterrestre que consegue alcançar a

terra e menor será a proporção de radiação difusa na componente global. Por outro lado, quanto menor for o índice de claridade, o que acontece em dias nublados, menor será a parcela da radiação extraterrestre que chega até o solo e maior será a proporção de radiação difusa. Das relações entre  $k_t$  e  $k_d$ , destaca-se a correlação de A. Miguel em 2001 [134], cuja relação é expressa [90]:

$$k_d(k_t) = \begin{cases} 0,995 - 0,081k_t & \text{se } k_t \leq 0,21 \\ 0,724 + 2,738k_t - 8,32k_t^2 + 4,967k_t^3 & \text{se } 0,21 < k_t \leq 0,76 \\ 0,18 & \text{se } k_t > 0,76 \end{cases} \quad (4.1.)$$

Onde  $k_t$ , índice de claridade, é obtido pela seguinte expressão:

$$k_t = \frac{I_{gh}}{I_{ext}} \quad (4.2.)$$

Para a obtenção da Intensidade da Radiação Direta Normal ( $I_i$ ), são necessários os seguintes dados [17]:

- Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal ( $I_{dh}$ );
- Intensidade da Radiação Global em Superfície Horizontal ( $I_{gh}$ );
- Altura Solar ( $h$ ).

$$I_i = \frac{I_{gh} - I_{dh}}{\text{sen}(h)} \quad (4.3.)$$

A altura do Sol ( $h$ ) pode ser calculada por:

$$h = \text{sen}^{-1}(\cos \lambda \cos \delta \cos H + \text{sen} \lambda \text{sen} \delta) \quad (4.4.)$$

em que:

$\delta$  – Declinação solar:

$$\delta = 23,5 \text{sen} \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (4.5.)$$

onde  $n$  é o dia do ano Juliano;

$\lambda$  – Latitude em graus (valores positivos para o hemisfério Norte);

$H$  – Ângulo horário do sol em graus:

$$H = 15 \left( TL + \frac{ET}{60} - 12 \right) + L_{ms} - L_{ml} \quad (4.6.)$$

$TL$  – Tempo local (0 – 24 horas);

$ET$  – Equação do tempo, em minutos do arco;

$$ET = 9,87 \text{sen}(1,987n - 160,22) - 7,53 \cos(0,989n - 80,11) - 1,5 \text{sen}(0,989n - 80,11) \quad (4.7.)$$

$L_{ms}$  – Longitude do meridiano central do fuso horário a que o local está vinculado em graus;

$L_{ml}$  – Longitude do local em graus (valores positivos para Oeste do meridiano de Greenwich).



O cálculo da radiação solar só faz sentido entre a nascer e o pôr-do-sol, ou seja, para alturas do sol positivas ( $h > 0$ ). O nascer e o pôr-do-sol tiram-se da condição  $h = 0$ , vindo:

$$H^* = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \lambda) \quad (4.8.)$$

Donde  $H^*$  é positivo para o pôr-do-sol e negativo para o nascer do sol.

As relações que conduziram à expressão de  $H$  foram as seguintes:

$$TSV = 12 + (24/360) H \quad (4.9.)$$

$$TMS = TL + (L_{ms} - L_{ml})/15 \quad (4.10.)$$

$$TSV = TSM + ET/60 \quad (4.11.)$$

onde:

$TSV$  – Tempo solar verdadeiro

$TSM$  – Tempo médio solar

Convém, ainda, dalientar que  $H$  é positivo a partir do meio-dia solar, na base de  $15^\circ$  por hora e  $TSV$  é refere-se ao tempo em minutos de arco.

O cálculo da altura solar é feito hora a hora. Como se pode observar a altura solar aumenta do nascer do Sol até ao meio-dia e diminui até ao pôr-do-sol, como seria de esperar.

Apresentam-se na figura 4.5 os dados climáticos registados no local para a temperatura exterior, humidade relativa, radiação solar (Radiação Global em Superfície Horizontal em  $\text{Wh/m}^2$ ) e velocidade do vento.

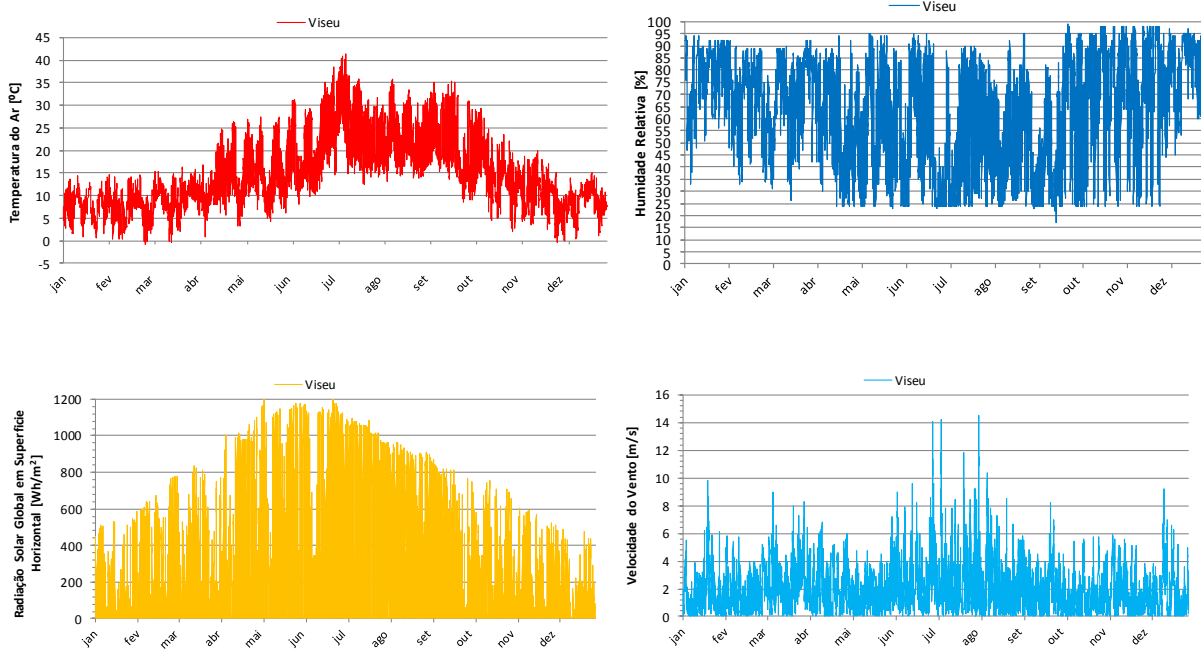


Fig.4.5. - Dados Climáticos medidos para Viseu

Os restantes dados necessários para o ficheiro climático em tempo real foram considerados por defeito, nomeadamente:

- Radiação Solar (Extraterrestre Horizontal, Extraterrestre Direta Normal, Radiação Infravermelha Horizontal do Céu);



- Iluminação (Global Horizontal, Direta Normal, Difusa Horizontal, Luminância Zénite);
- Cobertura do Céu (Total – quantidade de Nuvens, Opaco, Visibilidade, Altura das Nuvens);
- Precipitação;
- Profundidade dos Raios de Sol;
- Neve (Profundidade, Dias desde a Última Queda de Neve).

#### 4.3.1.7. Validação

Os modelos criados, antes de poderem ser utilizados num processo de otimização das soluções construtivas, devem ser devidamente validados. Como foi referido no ponto §2.1.3.3 uma das opções para a validação dos modelos é através da comparação com os dados obtidos nas campanhas experimentais. Neste caso, o que se teve em consideração foi sobretudo validar a utilização do programa e a capacidade de simular a realidade mediante a representação do objeto de estudo num modelo geométrico físico simplificado.

Apesar de se ter adotado um nível de pormenor elevado na elaboração dos modelos, não é de todo expectável um ajuste perfeito entre os resultados obtidos na simulação e o das medições, uma vez que existe um elevado número de variáveis em consideração cuja contabilização nos modelos ou é mesmo impossível, ou tornaria o tempo de simulação de tal forma extenso que inviabilizaria a sua utilização prática, como mais tarde concluímos.

Assim, destacam-se alguns dos fatores como potenciais fontes de erro nos resultados obtidos na simulação computacional dos modelos criados:

- O perfil de ocupação utilizado foi definido a partir do horário de ocupação das salas de aulas e consideram uma taxa de ocupação média de 20 alunos, não sendo possível contabilizar ao certo o número de presenças, uma vez que os turnos têm um número variável de alunos e as presenças nas aulas não é obrigatória, a ocupação, a iluminação das salas e a utilização dos equipamentos é intermitente ao longo do dia, principalmente porque em algumas aulas os alunos utilizam os seus computadores. Tendo em consideração que a parcela referente aos ganhos internos é decisiva para o balanço térmico global destes espaços, fica claro que as simplificações adotadas terão, forçosamente, um impacto relevante nos resultados finais da simulação, sendo responsável por erros que podem ser significativos;
- Foi considerado que em todos os vãos envidraçados os dispositivos de proteção solar (estores), quando existentes, tinham o mesmo funcionamento. Mais uma vez, o procedimento adotado não prevê qualquer alteração pontual relativa à utilização dos estores, situação que, provavelmente, terá ocorrido com alguma frequência. Tendo em consideração que a parcela referente aos ganhos solares também é decisiva para o balanço térmico global destes espaços, mesmo durante os meses de inverno, fica claro que as simplificações adotadas também terão, forçosamente, um impacto relevante nos resultados finais da simulação, sendo responsável por erros que podem ser significativos;
- Foi considerado um valor constante de admissão de ar novo nos espaços considerados nos modelos, obtido por ponderação dos resultados das medições dos caudais de ventilação através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive. O procedimento adotado não prevê qualquer abertura pontual dos vãos envidraçados, situação que, provavelmente, terá ocorrido com alguma frequência, mesmo durante os meses de inverno. No entanto, considerar caudais de

ventilação variáveis em todos os espaços modelados, além de implicar o registo *in situ* da abertura dos vãos envidraçados e portas, aumentaria significativamente o número e o tempo de simulação;

- Na colocação dos equipamentos de monitorização deve evitar-se localizações que possam influenciar os resultados, tais como junto de portas, vãos envidraçados, fontes de calor, entradas de ar, etc. No entanto alguns dos equipamentos foram colocados intencionalmente junto dos vãos envidraçados, para averiguar o efeito da radiação solar sobre o conforto térmico dos ocupantes;
- As características de alguns *data logger* utilizados, nomeadamente o erro máximo e a resolução, podem conduzir a diferenças com alguma relevância;
- O facto de no ficheiro climático se terem adotado alguns valores por defeito também pode ser fonte de erro.

Na figura 4.6 apresentam-se os resultados da comparação entre os valores obtidos na simulação e os registados nas medições para a temperatura do ar, relativas ao centro dos espaços (sala de aulas (S) e gabinete (G)) durante a Campanha de Verão (V) para a condição de medição V1 (estore 0% ativado).

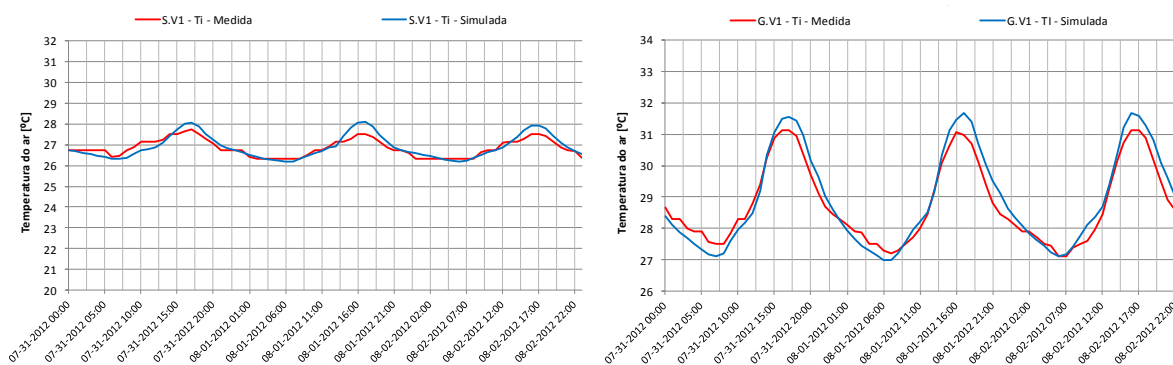


Fig.4.6. – Comparação entre os resultados da simulação e da medição, durante a Campanha de Verão para a condição (V1): à esquerda para a sala de aulas e à direita para o gabinete

Na figura 4.7 apresentam-se os resultados da comparação entre os valores obtidos na simulação e os registados nas medições para a temperatura do ar, relativas ao centro dos espaços (sala de aulas e gabinete) durante a Campanha de Inverno (I) para a condição de medição I1 (estore 0% ativado e sem aquecimento).

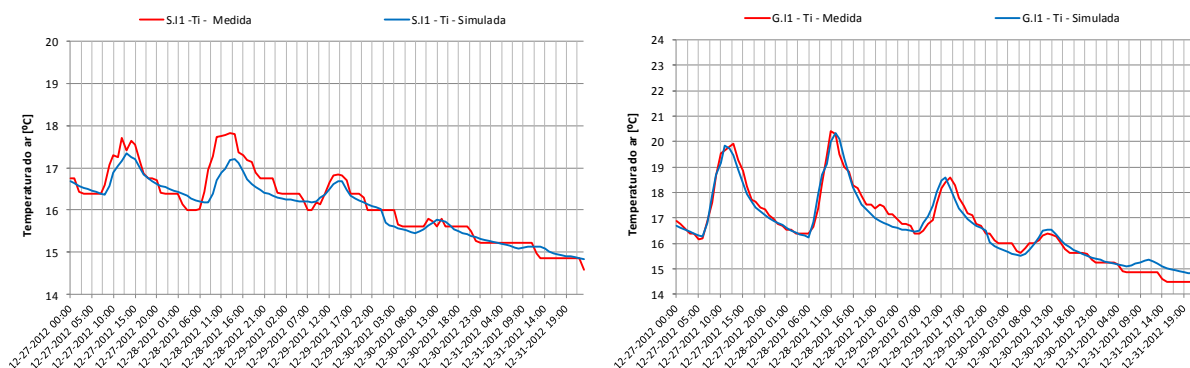


Fig.4.7. – Comparação entre os resultados da simulação e da medição, durante a Campanha de Inverno para a condição (I1): à esquerda para a sala de aulas e à direita para o gabinete

O ajuste da temperatura do ar interior está mais próximo no inverno, para ambos os espaços estudados, o período em análise diz respeito às Férias de Natal, em que não existem ganhos internos devidos à ocupação, iluminação e equipamentos.

Podemos concluir que os resultados obtidos são perfeitamente adequados para os objetivos deste trabalho. Convém, realçar que as tendências de variação dos valores simulados acompanham com muita aproximação as dos valores medidos.

#### 4.3.2. MODELO DE EDIFÍCIO PARA O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

##### 4.3.2.1. Introdução

Para otimizar a seleção dos vãos envidraçados, foi criado um modelo de edifício que permitisse simultaneamente simular diferentes condições para a envolvente exterior, nomeadamente: área de fachada, altura do espaço no edifício (em contato com o solo, nível intermédio e sob a cobertura exterior). Como se pretende analisar as condições adequadas de conforto térmico no interior do edifício (com o mínimo consumo de energia) em função das suas características e para determinado tipo de exposição exterior, considerou-se como adiabática toda a envolvente interior, anulando desta forma as trocas de calor entre espaços do mesmo edifício, permitindo posteriormente a análise do comportamento de um edifício composto por vários destes espaços.

##### 4.3.2.2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Foi criado o modelo de um edifício com vários pisos, com diferentes espaços (A, B, C e D) cuja geometria corresponde a situações construtivas correntes para edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, com diferentes tipos de envolvente (paredes, pavimentos e cobertura), para a mesma orientação e localização geográfica, representado na figura 4.8.

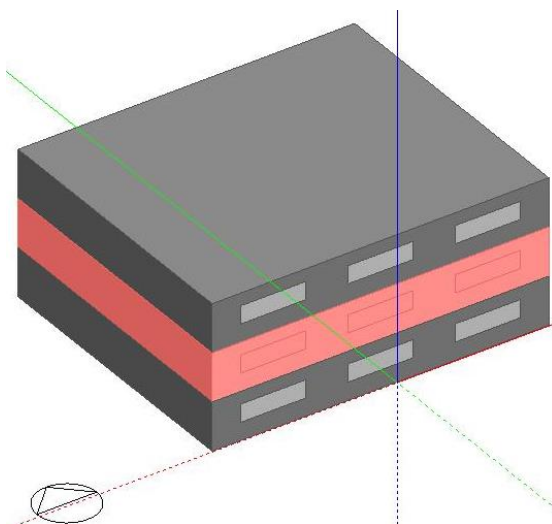


Fig.4.8. - Modelo do Edifício

Para esse efeito o modelo criado é constituído por um edifício multifamiliar/multiusos (18,00 m x 15,00 m) com três pisos (Piso 0 – sobre o solo, Piso 1 – nível intermédio e Piso 2 – sob a cobertura), cada piso é constituído por quatro espaços (A, B, C e D), sendo a que se situa na fachada oposta adiabática (D – espaço tampão), os espaços A, B e C representam situações a estudar com 6,00 m de fachada (na orientação em análise) e com profundidade variável, os espaços A e C têm duas

paredes exteriores (fachadas), por essa razão foi apenas analisado o espaço A, considerando a existência do vão envidraçado apenas na orientação em análise. O espaço B só tem uma fachada. Obtemos, deste modo, espaços com fatores de forma diferentes, representados nas figuras 9.9 a 4.12:

- Piso 0 – Sobre o Solo – espaços em que o pavimento está em contato com o solo (A.0 e B.0);
- Piso 1 – Nível Intermédio – espaços localizados em andares intermédios (A.1 e B.1);
- Piso 2 – Sob a Cobertura – espaços em que o teto está em contato com o exterior (A.2 e B.2).

As dimensões foram escolhidas por forma a representar as dimensões médias de um edifício e permitir alterar a profundidade dos espaços sem ser necessário construir um novo edifício, assim cada espaço pode ter até 12,00 m de profundidade, de modo a garantir que o lado maior não seja superior a duas vezes o lado menor, para o caso de não existirem vãos envidraçados nas duas fachadas, como é o caso.

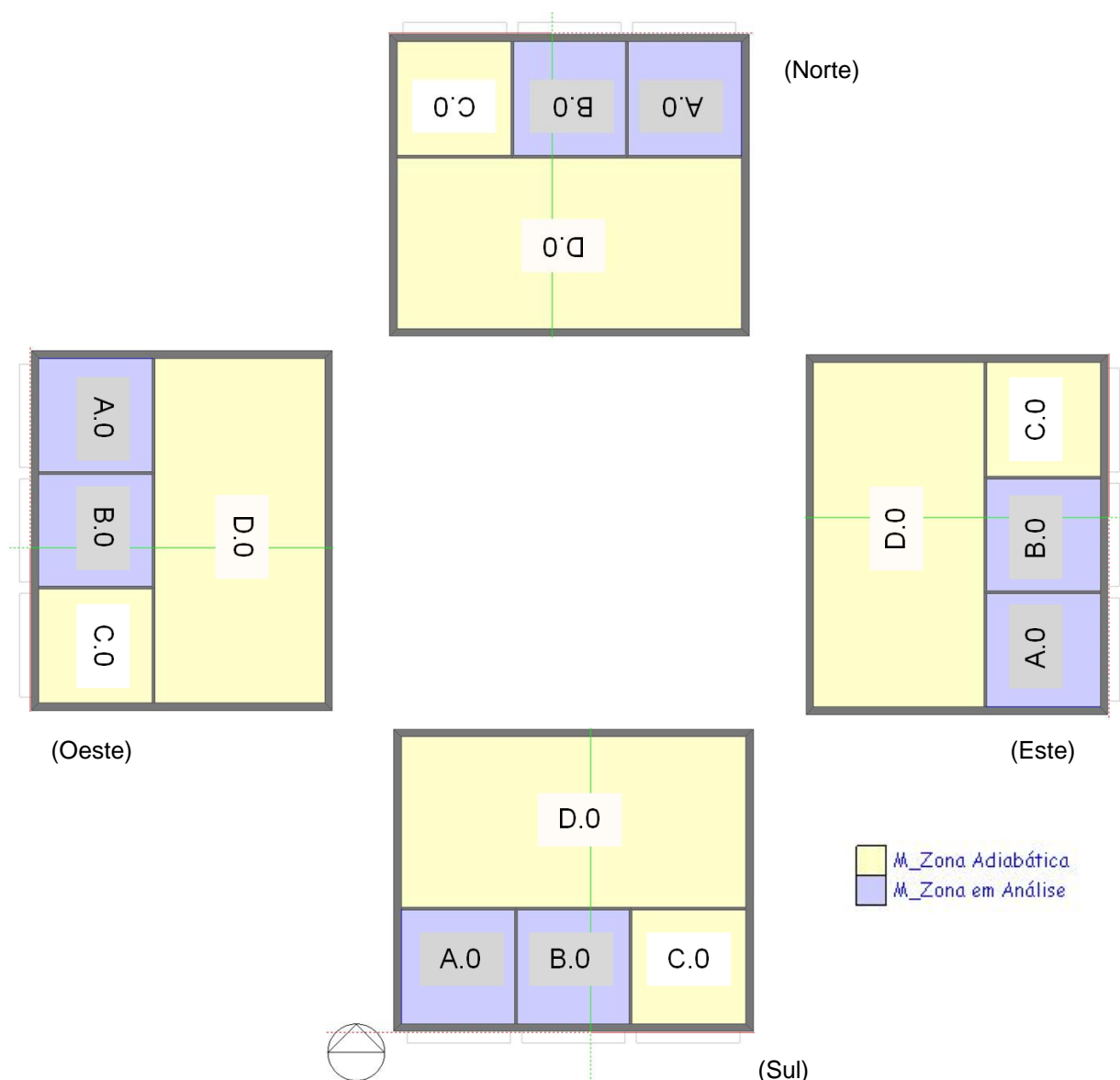


Fig.4.9 - Edifício Modelo – Orientação dos vãos envidraçados (Norte, Este, Sul, Oeste)

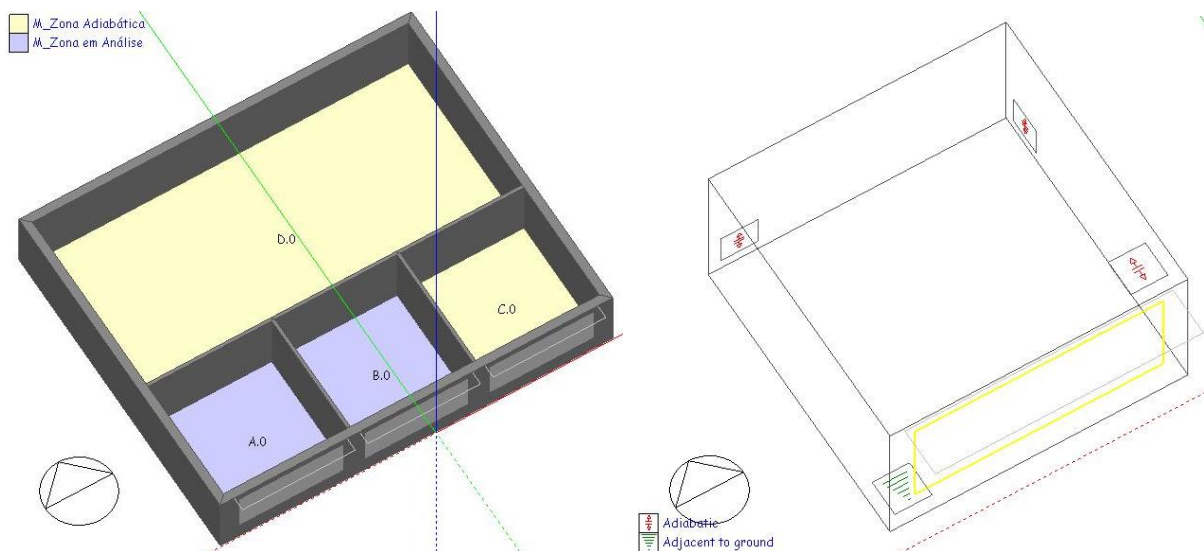


Fig.4.10. - Piso 0 – Sobre o Solo, Espaços: A.0, B.0, C.0 e D.0 com a envolvente interior adiabática

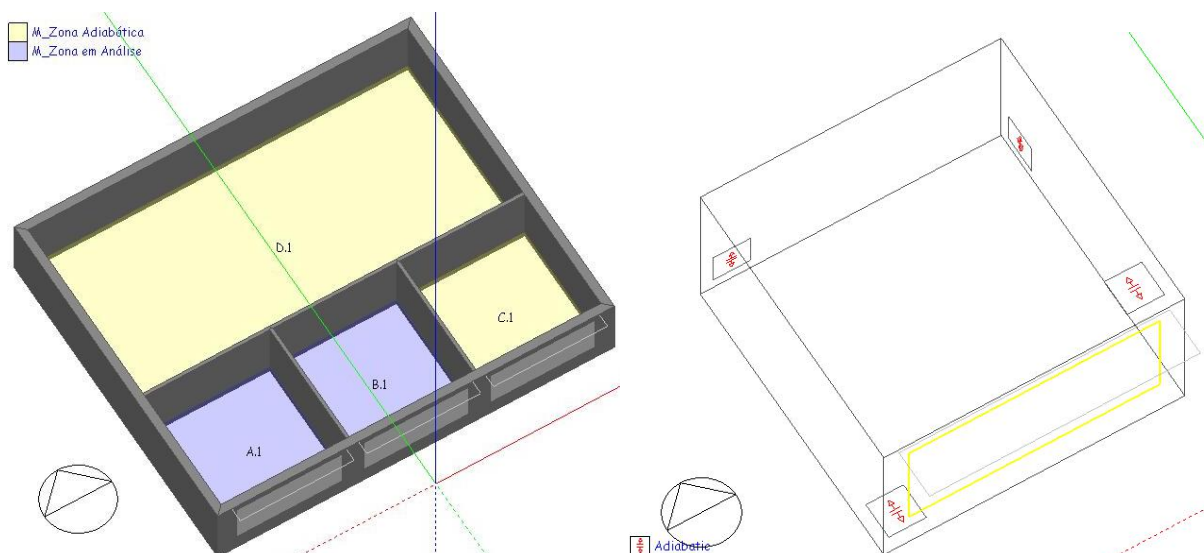


Fig.4.11 - Piso 1 – Nível Intermédio, Espaços: A.1, B.1, C.1 e D.1 com a envolvente interior adiabática

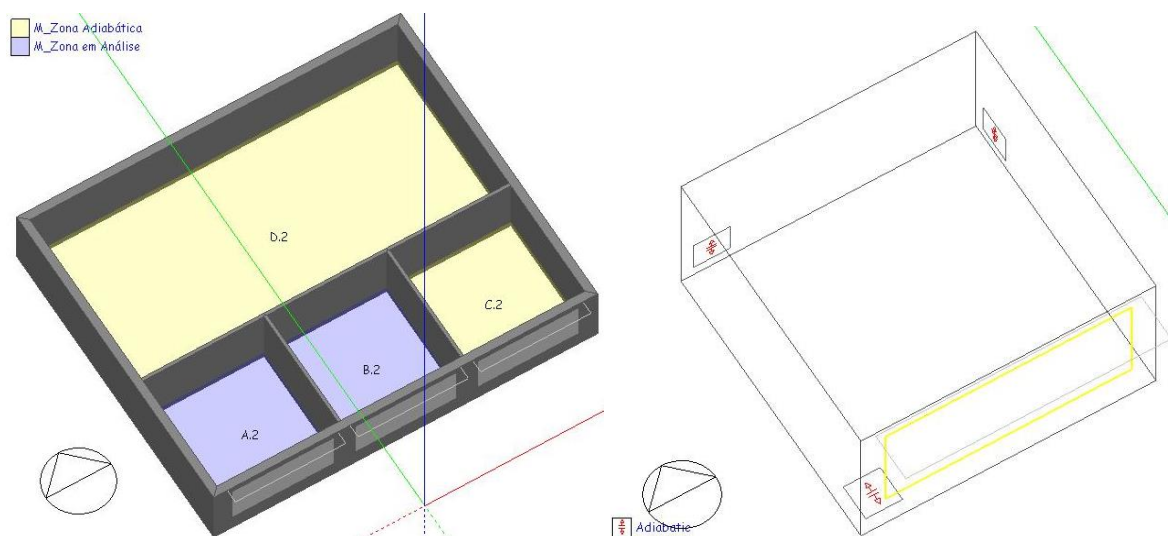


Fig.4.12. - Piso 2 – Sob a Cobertura, Espaços: A.2, B.2, C.2 e D.2 com a envolvente interior adiabática

#### 4.4. VARIÁVEIS EM ESTUDO

##### 4.4.1. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS

O segundo passo para formulação do problema de otimização será a escolha das variáveis e das respetivas opções a incluir no estudo.

As variáveis a otimizar devem corresponder a propriedades e características dos vãos envidraçados que representam o seu desempenho térmico e energético e, obviamente, podem ser alteradas/melhoradas quer no projeto de edifícios novos, quer em projetos de reabilitação. Por outro lado, não nos podemos esquecer que o desempenho térmico e energético dos espaços em estudo pode ser influenciado pelas características dos elementos construtivos e geometria do próprio edifício, do tipo de utilização, controlo da temperatura interior: sem e com climatização (aquecimento e arrefecimento).

A partir destes pressupostos foram definidos quatro grupos de variáveis, o primeiro grupo relativo às propriedades dos vãos envidraçados; o segundo grupo relativo à geometria do vão; o terceiro grupo relativo ao espaço que estes servem e o quarto grupo relativo à localização do edifício e do espaço a simular no edifício.

As variáveis relacionadas com as propriedades dos vãos envidraçados são as seguintes (7 variáveis):

- Coeficiente de transmissão térmica do vidro,  $U_{\text{vidro}}$ ;
- Fator solar do vidro,  $g_T$ ;
- Coeficiente de transmissão térmica do caixilho,  $U_{\text{caixilho}}$ ;
- Dispositivos de proteção solar,  $P_s$ ;
- Permeabilidade ao ar,  $R_a$ ;
- Fração envidraçada,  $F_g$ ;
- Orientação do vão envidraçado (Norte, Este, Oeste e Sul).

As variáveis relacionadas com o sombreamento e geometria do vão envidraçado são as seguintes (2 variáveis):

- Sombreamento dos elementos exteriores horizontais e verticais,  $SE$ ;
- Relação entre a área do vão envidraçado e a área de pavimento,  $A_{\text{env}}/A_p$  ( $A_e$ ).

As variáveis relacionadas com as propriedades e características dos elementos construtivos, geometria e utilização do espaço a simular que os vãos envidraçados servem são as seguintes (8 variáveis):

- Coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior,  $U$ ;
- Inércia térmica do espaço a simular,  $I_t$ ;
- Cor da face exterior da fachada, coeficiente de absorção da radiação solar,  $\alpha$ ;
- Profundidade, distância entre a fachada (onde está inserida o vão) e a parede oposta,  $Prof$ ;
- Pé-direito do espaço a simular,  $P_d$ ;
- Renovações horárias do ar,  $R_a$ ;
- Ganhos internos (ocupação, equipamentos e iluminação),  $G_i$ ;
- Controlo da temperatura interior,  $C_{ti}$ .

As variáveis relacionadas com a localização geográfica do edifício e do espaço a simular no edifício são as seguintes (3 variáveis):

- Localização geográfica do edifício (Bragança, Porto, Évora);
- Localização do espaço a simular no edifício em relação à exposição ao exterior (canto, central);
- Localização do espaço a simular em altura no edifício (Piso 0 – sobre o solo, Piso 1 – nível intermédio, Piso 2 – sob a cobertura).

Para a caracterização do coeficiente de transmissão térmica e da inércia térmica do espaço a simular, foram definidos dois tipos de elementos construtivos, um constituído por elementos pesados (inércia térmica forte) e outro com elementos mais leves (inércia térmica fraca) em contato com o interior do espaço em análise. Por sua vez, para os elementos da envolvente exterior foram colocadas diferentes espessuras de isolamento térmico.

No total temos 20 variáveis. Os limites escolhidos para cada uma das variáveis em estudo tiveram por base critérios relacionados com a realidade construtiva em Portugal e as exigências regulamentares, nomeadamente os limites referidos no REH e no RECS [8].

No quadro 4.4 é apresentado o esquema geral das variáveis relacionadas com as propriedades e orientação dos vãos envidraçados. No quadro são também fornecidos “códigos” de identificação dos cenários simulados.

Quadro 4.4. – Esquema geral das variáveis relacionadas com os vãos envidraçados

Coeficiente de transmissão térmica do vidro - $U_{\text{vidro}}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]			
Vs - Vidro simples		Vd - Vidro duplo	
Total de combinações: 2 (1 x 2)			
Vidro simples (Vs)			
Incolor	Verde	LoE <sup>(1)</sup>	
Vidro duplo (Vd)			
Incolor	Verde	LoE <sup>(1)</sup>	
Total de combinações: 6 (3 x 2)			
Fator solar do vidro - $g$ [-]			
Estação de aquecimento - $g_{\perp,vi}$ [-] em função do tipo de vidro (Vidro simples, Vidro duplo)			
Estação de arrefecimento - $g_T$ [-] em função do tipo de dispositivos de proteção solar <sup>(2)</sup>			
Pse - Proteção exterior	Psi - Proteção interior	sPs - Sem proteção	
Total de combinações: 18 (6 x 3)			
Coeficiente de transmissão térmica do caixilho - $U_{\text{caixilho}}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]			
Al sem Corte Térmico – Alumínio sem corte térmico		Al com Corte Térmico - Alumínio com corte térmico	
Total de combinações: 36 (18 x 2)			
Permeabilidade ao ar, infiltrações – $R_a$ [h <sup>-1</sup> ]			
Considerada na caracterização dos espaços a simular			
Fração envidraçada - $F_g$			
Caixilho com 65 mm de espessura e sem quadrículas			
Orientação do vão envidraçado			
Norte	Este	Sul	Oeste
Total de combinações: 144 (36 x 4)			

(1) Vidro com baixa emissividade (low  $\epsilon$ ).

(2) Dispositivos de proteção solar - Estores venezianos de lâminas metálicas.

No quadro 4.5 é apresentado o esquema geral das variáveis relacionadas com as propriedades e características dos elementos construtivos, geometria e utilização do espaço a simular que os vãos envidraçados servem. No quadro são também fornecidos “códigos” de identificação dos cenários simulados.

Quadro 4.5. – Esquema geral das variáveis relacionadas com o espaço a simular

Coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior – $U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]		
[EI_3/6 cm]	[EI_6/12 cm]	
Espessura do isolamento térmico dos elementos da envolvente exterior (EI) [EI <sub>parede</sub> / EI <sub>cobertura</sub> ]		
Total de combinações: 288 (144 x 2)		
Inércia térmica - $I_t$		
F - Inércia térmica forte	f - Inércia térmica fraca	
Total de combinações: 576 (288 x 2)		
Cor da superfície exterior da fachada, coeficiente de absorção da radiação solar - $\alpha$		
C (Clara) - Branca ( $\alpha = 0,4$ )	E (Escura) - Castanha ( $\alpha = 0,8$ )	
Total de combinações: 1152 (576 x 2)		
Profundidade do espaço simulado - Prof		
Prof1 - 3,00 m	Prof2 - 6,00 m	Prof3 - 9,00 m
Total de combinações: 3456 (1152 x 3)		
Pé-direito do espaço simulado – Pd <sup>(1)</sup>		
3,00 m		
Renovações horárias do ar – Ra [h <sup>-1</sup> ]		
Ra1 - [0,6/0,0]	Ra2 - [0,6/2,0]	
[Ventilação mínima / Ventilação noturna]		
Ra1 - Ventilação mínima (permanente), sem abertura das janelas (infiltrações)		
Ra2 - Ventilação mínima (permanente) + Ventilação noturna (18:00 – 24:00), abertura das janelas, durante a estação de arrefecimento		
Total de combinações: 69128 (3456 x 2)		
Ganhos internos (ocupação, equipamento, iluminação) - Gi		
Ocupação - em função da taxa de ocupação de 0,056 [ocupantes/m <sup>2</sup> ]: (00:00 – 09:00) e (18:00 – 24:00)		
Equipamento - sem equipamento		
Iluminação - em função dos valores máximos de densidade de potência de iluminação de 2,0 [(W/m <sup>2</sup> )/100lux]:		
Estação de aquecimento (i): (07:00 – 09:00) 100%, (18:00 – 22:00) 100% e (22:00 – 24:00) 50%		
Estação de arrefecimento (v): (07:00 – 08:00) 100%, (20:00 – 22:00) 100% e (22:00 – 24:00) 50%		
Controlo da temperatura interior - Cti		
Ctis	Ctic	
Ctis - Sem climatização		
Ctic - Com climatização (aquecimento e arrefecimento)		
Estação de aquecimento (i): Temperatura de controlo - 18°C (00:00 – 24:00)		
Estação de arrefecimento (v): Temperatura de controlo - 25°C (00:00 – 24:00)		
Total de combinações: 13824 (6912 x 2)		

(1) Por forma a permitir inserir um vão envidraçado com 30% de área para uma de profundidade de 9,00 m e a colocar os elementos de sombreamento exteriores.



No quadro 4.6 é apresentado o esquema geral das variáveis relacionadas com o sombreamento e geometria dos vãos envidraçados. No quadro são também fornecidos “códigos” de identificação dos cenários simulados.

Quadro 4.6. – Esquema geral das variáveis relacionadas com o sombreamento e geometria do vão envidraçado

Sombreamento por elementos exteriores - SE		
SEs - Sem sombreamento	SEh - Elemento horizontal <sup>(1)</sup>	SEv - Elementos verticais <sup>(2)</sup>
Total de combinações: 41472 (13824 x 3)		
Relação entre a área do vão envidraçado e a área de pavimento, $A_{env}/A_p - Ae$		
Ae10 - 10%	Ae15 - 15%	Ae30 - 30%
Total de combinações: 124416 (41472 x 3)		

(1) Elemento horizontal com 1,00 m de largura, com prolongamento lateral e afastado do vão envidraçado 0,20 m.

(2) Elemento vertical com 1,00 m, com prolongamento superior e afastado do vão envidraçado 0,20 m.

No quadro 4.7 é apresentado o esquema geral das variáveis relacionadas com a localização geográfica do edifício e do espaço a simular. No quadro são também fornecidos “códigos” de identificação dos cenários simulados.

Quadro 4.7. – Esquema geral das variáveis relacionadas com a localização geográfica do edifício e do espaço a simular no edifício

Localização geográfica do edifício					
Bra - Bragança		Evo - Évora		Por - Porto	
Total de combinações: 373248 (124416 x 3)					
Localização do espaço no edifício em relação à exposição ao exterior					
A - Espaço de Canto <sup>(1)</sup>			B - Espaço Central <sup>(2)</sup>		
Total de combinações: 746496 (373248 x 2)					
Localização do espaço em altura no edifício					
A.0	B.0	A.1	B.1	A.2	B.2
Piso 0 – Em contato com o solo		Piso 1 - Intermédio		Piso 2 – Sob a Cobertura	
Total de combinações: <b>2239488</b> (746496 x 3)					

(1) Com duas paredes exteriores (fachadas) com o vão envidraçado na orientação em análise.

(2) Com apenas uma parede exterior (fachada).

O desempenho dos vãos envidraçados é condicionado pela sua orientação (N, E, W e S) e pelo clima exterior, logo o processo de otimização conduzirá a diferentes soluções em função da sua localização. O REH [8] divide o território português em três zonas climáticas de inverno ( $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ ) e três de verão ( $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ ).

Face à dimensão do plano de combinações definido deste trabalho, seria impossível, num período de tempo razoável, conseguir-se estudar todas as combinações possíveis de zonas climáticas. Por essa razão, foram escolhidas três localizações, Porto - Por ( $I_1, V_1$ ), Bragança – Bra ( $I_3, V_2$ ) e Évora - Evo ( $I_1, V_3$ ) REH [8]. Pelo RCCTE [82] o Porto seria  $I_2$ .

O número final de variáveis em estudo é igual a 15, porque consideramos que, das variáveis inicialmente propostas, três são constantes (Fg, Pd e Gi) e duas são consideradas em simultâneo com outras variáveis (g e Ra), o número total de combinações foi de 2 239 488.

No ponto §4.4.3. deste capítulo será apresentado um estudo de sensibilidade justificando porque se optou por determinadas variáveis em detrimento de outras e os valores para essas variáveis.

#### 4.4.2. DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DAS VARIÁVEIS

##### 4.4.2.1 Introdução

Para a configuração das variáveis em estudo foram criados vários ficheiros IDF para correr no programa *EnergyPlus* através de uma macro criada no programa Excel para o efeito, no total foram simulados 373 248 ficheiros IDF e posteriormente tratados, também através do recurso a macros criadas no programa Excel. Como para configurar a relação entre a área do vão envidraçado e a do pavimento (Ae) e a profundidade (Prof) do espaço a simular, implicou a alteração da geometria do modelo (profundidade e a área do vão envidraçado), para minimizar os erros de ligação dos vários elementos e de simulação, foram elaborados 18 modelos do edifício no programa *DesignBuilder* [11], ver quadro 4.7.

##### 4.4.2.2 Variáveis Relacionadas com o Espaço a Simular

Configuração das variáveis relacionadas com a geometria e as características dos elementos construtivos e caracterização da utilização do espaço a simular.

A profundidade (Prof) do modelo do espaço a simular criado no programa *DesignBuilder* é variável entre 3,00, 6,00 e 9,00 metros. Já a fachada na orientação em análise tem 6,00 m de largura.

Com o objetivo de analisar a contribuição dos vãos envidraçados, para as condições interiores, em função da sua orientação, optou-se por colocar o vão envidraçado só numa fachada, aproveitando ao máximo a área de fachada em análise disponível, por essa razão adotaram-se as seguintes relações entre a área do vão envidraçado e a área do compartimento que serve de 10, 15 e 30%. No quadro 4.8 apresenta-se a relação entre a área do vão envidraçado e a área de pavimento (Ae) em função da profundidade (Prof).

Quadro 4.8. – Relação entre a área do vão envidraçado e a área de pavimento (comprimento x altura) em função da profundidade

Profundidade	Pavimento (A <sub>p</sub> )		Fachada			Vão Envidraçado (A <sub>env</sub> )		
	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	%	[m <sup>2</sup> ]	Comp. [m]	Altura [m]
Prof1	6 x 3	18,00	6 x 3,00	18,00	10	1,80	1,80	1,00
Prof2	6 x 6	36,00				3,60	3,60	1,00
Prof3	6 x 9	54,00				5,40	5,00	1,08
Prof1	6 x 3	18,00			15	2,70	2,70	1,00
Prof2	6 x 6	36,00				5,40	5,00	1,08
Prof3	6 x 9	54,00				8,10	5,00	1,62
Prof1	6 x 3	18,00			30	5,40	5,00	1,08
Prof2	6 x 6	36,00				10,80	5,40	2,00
Prof3	6 x 9	54,00				16,20	5,40	3,00

Como se pretende fazer uma caracterização dos edifício de habitação e dos edifícios de serviços, sem grandes ganhos internos, adotou-se por considerar um pé-direito (Pd) de 3,00 metros no modelo do espaço a simular.

A modelação dos elementos construtivos que fazem parte da envolvente foi pormenorizada, tendo-se caracterizado em detalhe as propriedades dos materiais que os constituem:

- Inércia térmica do espaço a simular;
- Coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior;
- Cor da superfície exterior da fachada, coeficiente de absorção da radiação solar.

O programa *DesignBuilder* permite caracterizar o revestimento quanto à sua cor (branco - C e castanho - E) e quanto à sua rugosidade. Neste trabalho optou-se por rugosidade lisa. Em todas as combinações considerou-se a cor clara para o revestimento da cobertura.

Em relação ao coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior, foram definidas duas soluções construtivas, em função da espessura do isolamento térmico (EI) dos elementos da envolvente exterior (parede e cobertura) [ $EI_{parede} / EI_{cobertura}$ ], quadro 4.9:

(1) [ $EI_3 / 6$  cm];

(2) [ $EI_6 / 12$  cm].

Para cada modelo do edifício foram seleccionados dois grupos de elementos construtivos para a envolvente exterior e interior, um com inércia térmica forte (F) e outro com inércia térmica fraca (f). No quadro 4.10 apresentam-se para cada elemento construtivo os materiais e as suas propriedades térmicas, para o edifício com inércia térmica forte. No quadro 4.11 apresentam-se para cada elemento construtivo os materiais e as suas propriedades térmicas, para o edifício com inércia térmica fraca. A ordem de apresentação dos materiais nas tabelas é do exterior para o interior, como são introduzidos no programa *DesignBuilder* [11].

Quadro 4.9. – Síntese com o coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente

Elemento Construtivo	Espessura do isolamento térmico	Inércia térmica forte (F)	Inércia térmica fraca (f)
		$U [W/m^2 \cdot ^\circ C]$	
Parede exterior	3 cm	0,549	0,525
	6 cm	0,389	0,377
Pavimento – Sobre o Solo	-	1,700	1,010
Cobertura	6 cm	0,450	0,420
	12 cm	0,260	0,250

Em relação ao sombreamento por elementos exteriores (SE), para o presente estudo foram definidas três possibilidades para a utilização dos elementos de sombreamento em betão armado com revestimento de cor clara, com 0,10 m de espessura, com 1,00 m de profundidade e afastados 0,20 m do vão envidraçado: (SEs) sem elementos de sombreamento, (SEh) sombreamento por elemento horizontal e (SEv) sombreamento por elementos verticais em ambos os lados do vão envidraçado, figura 4.13.

Quadro 4.10. – Constituição dos elementos construtivos para a inércia térmica forte (F)

		$\lambda$	$Espessura$	$R$	$\rho$	$C_p$	
$Material$		[W/m.°C]	[m]	[m².°C/W]	[kg/m³]	[J/kg.°C]	
Parede Exterior - F	1	Reboco tradicional	1,300	0,020	0,015	2000	837
	2	Tijolo furado de 15	0,385	0,150	0,390	1100	936
	3	Espaço de ar		0,030	0,180		
	4	Isolamento térmico (EPS 15-20 kg/m³)	0,040	0,030	0,750	20	1210
	5	Tijolo furado de 11	0,407	0,011	0,270	1100	936
	6	Reboco em estuque projetado	0,430	0,020	0,047	1000	837
$U_{total} (ITE 50) = 0,549 \text{ W/m}^2.\text{°C}$							
$[3/6] - U = 0,549 \text{ W/m}^2.\text{°C} - [6/12] - U = 0,389 \text{ W/m}^2.\text{°C}$							
Parede Interior - F	1	Reboco em estuque projetado	0,430	0,020	0,047	1000	837
	2	Tijolo furado de 11	0,407	0,011	0,270	1100	936
	3	Reboco em estuque projetado	0,430	0,020	0,047	1000	837
Pavimento – Solo - F	1	Laje em betão armado	2,00	0,020	0,10	2400	1080
	2	Camada de forma	0,70	0,080	0,114	1300	920
	3	Betonilha de regulação	1,30	0,035	0,027	1900	920
	4	Revestimento cerâmico	1,30	0,010	0,008	2300	920
$U_{total} (ITE 50) = 1,70 \text{ W/m}^2.\text{°C}$							
Pavimento Interior - F	1	Reboco em estuque projetado	0,430	0,020	0,047	1000	837
	2	Laje em betão armado	2,00	0,025	0,125	2400	1080
	3	Camada de forma	0,70	0,080	0,114	1300	920
	4	Betonilha de regulação	1,30	0,035	0,027	1900	920
	5	Revestimento cerâmico	1,30	0,010	0,008	2300	920
Cobertura - F	1	Proteção em godo lavado	2,00	0,100	0,050	2000	880
	2	Geotextil	0,210	0,002	0,010	300	1000
	3	Isolamento térmico (XPS)	0,037	0,060	1,622	35	1400
	4	Geotextil	0,210	0,002	0,010	300	1000
	5	Impermeabilização (PVC)	0,140	0,004	0,029	2300	920
	6	Betonilha de regulação	1,300	0,040	0,031	1900	920
	7	Camada de forma	0,700	0,100	0,143	1300	920
	8	Laje em betão armado	2,00	0,250	0,125	2400	1080
	9	Reboco em estuque projetado	0,430	0,020	0,047	1000	837
$U_{total} (ITE 50) = 0,45 \text{ W/m}^2.\text{°C}$							
$[3/6] - U = 0,450 \text{ W/m}^2.\text{°C} - [6/12] - U = 0,260 \text{ W/m}^2.\text{°C}$							

Quadro 4.11. – Constituição dos elementos construtivos para inércia térmica fraca (f)

	Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
Parede Exterior - f	1 Reboco tradicional	1,300	0,020	0,015	2000	837
	2 Tijolo furado de 22	0,423	0,220	0,520	1100	936
	3 Espaço de ar		0,030	0,180		
	4 Isolamento térmico (EPS 15-20 kg/m <sup>3</sup> )	0,040	0,030	0,750	20	1210
	5 Espaço de ar		0,015	0,170		
	6 Placa de gesso cartonado	0,250	0,025	0,100	750	1000
$U_{total} (ITE 50) = 0,525 \text{ W/m}^2.\text{°C}$						
[3/6] - $U = 0,525 \text{ W/m}^2.\text{°C}$ - [6/12] - $U = 0,377 \text{ W/m}^2.\text{°C}$						
Parede Interior - f	1 Placa de gesso cartonado	0,250	0,0125	0,050	750	1000
	2 Espaço de ar		0,0115	0,180		
	3 Placa de gesso cartonado	0,205	0,0125	0,050	750	1000
Pavimento – Solo - f	1 Laje em betão armado	2,00	0,020	0,10	2400	1080
	2 Camada de forma	0,70	0,080	0,114	1300	920
	3 Betonilha de regulação	1,30	0,035	0,027	1900	920
	4 Espaço de ar		0,050	0,210		
	5 Madeira Leve (freixo, faia, pinho, )	0,150	0,030	0,200	550	2750
$U_{total} (ITE 50) = 1,01 \text{ W/m}^2.\text{°C}$						
Pavimento Interior - f	1 Madeira Leve (freixo, faia, pinho, etc.)	0,150	0,030	0,200	550	2750
	2 Espaço de ar		0,050	0,110		
	3 Laje em betão armado	2,00	0,025	0,125	2400	1080
	4 Camada de forma	0,70	0,080	0,114	1300	920
	5 Betonilha de regulação	1,30	0,035	0,027	1900	920
	6 Espaço de ar		0,150	0,160		
	7 Placa de gesso cartonado	0,205	0,0125	0,050	750	1000
Cobertura - f	1 Proteção em godo lavado	2,00	0,100	0,050	2000	880
	2 Geotextil	0,210	0,002	0,010	300	1000
	3 Isolamento térmico (XPS)	0,037	0,060	1,622	35	1400
	4 Geotextil	0,210	0,002	0,010	300	1000
	5 Impermeabilização (PVC)	0,140	0,004	0,029	2300	920
	6 Betonilha de regulação	1,300	0,040	0,031	1900	920
	7 Camada de forma	0,700	0,100	0,143	1300	920
	8 Laje em betão armado	2,00	0,250	0,125	2400	1080
	9 Espaço de ar		0,150	0,160		
	10 Placa de gesso cartonado	0,205	0,0125	0,050	750	1000
$U_{total} (ITE 50) = 0,420 \text{ W/m}^2.\text{°C}$						
[3/6] - $U = 0,420 \text{ W/m}^2.\text{°C}$ - [6/12] - $U = 0,250 \text{ W/m}^2.\text{°C}$						

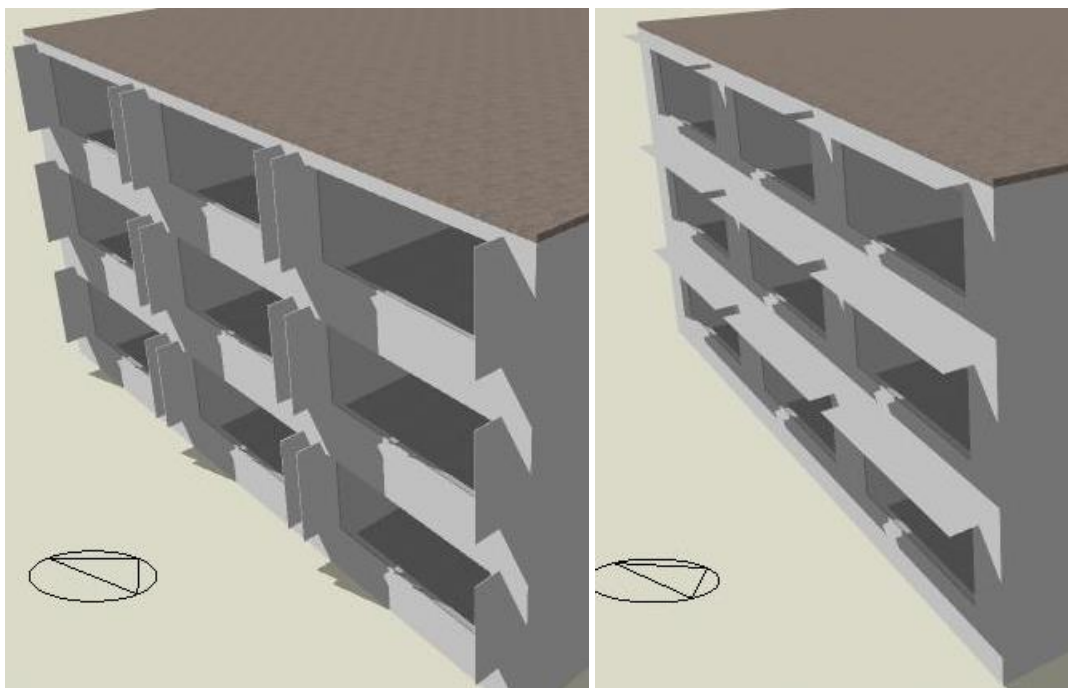


Fig.4.13. – Localização dos elementos exteriores de sombreamento: à esquerda as palas laterais e à direita as palas horizontais

As renovações de ar são um fator muito importante no comportamento térmico de um edifício, pois têm uma grande influência na temperatura do ar interior, na humidade relativa e na qualidade do ar interior.

No modelo do edifício em estudo não dispondo de dispositivos de admissão de ar na fachada, a ventilação deve-se exclusivamente às infiltrações de ar pelos vãos envidraçados durante todo o ano com  $0,6 \text{ h}^{-1}$  e à abertura parcial dos vãos envidraçados durante a noite, das 18:00 às 24:00 horas, durante a estação de arrefecimento permitindo  $2,0 \text{ h}^{-1}$ , com as seguintes combinações [Ventilação mínima / Ventilação noturna]:

- Ra1 [ $0,6/0,0 \text{ h}^{-1}$ ];
- Ra2 [ $0,6/2,0 \text{ h}^{-1}$ ].

em que:

Ra1 – Ventilação mínima, sem abertura dos vãos envidraçados (infiltrações).

Ra2 – Ventilação mínima + Ventilação noturna das 18:00 às 24:00 horas, abertura parcial dos vãos envidraçados, durante a estação de arrefecimento.

Os ganhos internos são uma componente fundamental do balanço térmico principalmente nos edifícios de serviços pelo que a sua correta contabilização é essencial para se obter um modelo com a fiabilidade necessária, tendo também em consideração os períodos de ocupação.

Os ganhos internos incluem as seguintes parcelas:

- Atividade metabólica (ocupação);
- Iluminação;
- Equipamento.

Os espaços a simular foram considerados para servirem para habitação, por essa razão foi adotado um tipo de ganhos internos devido a esse tipo de ocupação, representado no quadro 4.12.

Quadro 4.12. – Dados para a contabilização da atividade metabólica

Tipo de Ocupação	Metabolismo [W/ocupante]	Densidade [ocupantes/m <sup>2</sup> ]	Perfil de Ocupação	Ganhos Internos [W/m <sup>2</sup> ]
Habitação	80,5 (46 W/m <sup>2</sup> <sup>(1)</sup> x 1,75 m <sup>2</sup> <sup>(2)</sup> ) (ASHRAE 55 e ISO 7730)	1 / 18 m <sup>2</sup> = 0,056	18:00 às 09:00 horas	4,51
		2 / 36 m <sup>2</sup> = 0,056		
		3 / 54 m <sup>2</sup> = 0,056		

(1) Atividade, pessoa a descansar, corresponde a uma taxa metabólica 46 W/m<sup>2</sup> (0,8 met).

(2) Superfície do corpo de uma pessoa de tamanho médio (o programa *DesignBuilder* considera 1,8 m<sup>2</sup>).

A carga térmica relativa à iluminação foi definida em função dos valores máximos de densidade de potencia de iluminação (DPI – [(W/m<sup>2</sup>)/100lux]) estipulados pelo SCE\_RECS [8] a instalar nos edifícios de comércio e serviços, para os espaços a simular, habitação, adotou-se o valor mínimo, quadro 4.13.

Quadro 4.13. – Dados para a contabilização dos ganhos pela iluminação

Tipo de Ocupação	DPI [(W/m <sup>2</sup> )/100lux]	Iluminação mínima [lux]	Perfil de Iluminação <sup>(1)</sup>	Ganhos Internos [W/m <sup>2</sup> ]
Habitação	2,0	200	i: (07 – 09) 100%	4,00
			(18 – 22) 100%	
			(22 – 24) 50%	
			v: (07 – 08) 100%	
			(20 – 22) 100%	
			(22 – 24) 50%	

(1) Perfil diário da iluminação do edifício de habitação (i – Estação de aquecimento e v – Estação de arrefecimento).

Sendo um dos objetivos deste trabalho analisar a contribuição dos vãos envidraçados no conforto interior, é fundamental prever a contribuição destes para os ganhos obtidos, através dos ganhos solares. Por esse motivo não foram considerados ganhos térmicos internos devido aos equipamentos para os espaços a simular.

As simulações foram efetuadas para dois tipos de controlo da temperatura interior:

- Regime livre, sem nenhum tipo de sistema de climatização;
- Com sistemas de climatização (aquecimento e arrefecimento), e definição das respetivas temperatura de controlo.

No primeiro caso, a temperatura flutua livremente sem nenhum tipo de sistema de aquecimento ou arrefecimento, permitindo desta forma, obter as temperaturas interiores atingidas para cada caso, permitindo avaliar, com mais facilidade, a contribuição de cada variável em estudo nas condições de conforto interior e, principalmente a contribuição dos vãos envidraçados.

Para o segundo caso, considerou-se a existência de um sistema de aquecimento e arrefecimento a funcionar 24 horas durante toda a respetiva estação. Para o sistema de aquecimento foi escolhido um

sistema elétrico que apenas funciona quando a temperatura do ar interior for inferior a 18°C. Para o sistema de arrefecimento foi selecionado um sistema elétrico (Bomba de calor – COP = 3) que apenas funciona quando a temperatura do ar interior for superior a 25 °C.

A quantidade de energia fornecida ou extraída, para garantir as condições de controlo definidas, que corresponde respetivamente, às necessidades nominais de energia úteis para aquecimento e arrefecimento, sendo obtidas com a divisão do somatório da carga térmica, calculada numa base horária, pela área de pavimento em função da profundidade do espaço.

#### 4.4.2.3 Variáveis Relacionadas com os Vãos Envidraçados

Para configurar as propriedades relacionadas com os vãos envidraçados no programa *DesignBuilder*, para posteriormente fazer as simulações no programa *EnergyPlus* é necessário fornecer informações sobre todos os elementos que constituem os vãos envidraçados: tipo de vidro (*Glazing type*); tipo de caixilhos (*Frame and Dividers*); tipo, localização e funcionamento dos dispositivos de proteção solar (*Shading – Window shading*) e tipo e localização de elementos de sombreamento (*Shading – Local shading*).

Em relação ao tipo de vidro, o programa *DesignBuilder* tem uma base de dados com propriedades térmicas e óticas de vários tipos de vidro em função do fabricante, mas também podemos utilizar o programa *TERM* e o programa *WINDOW* [112], com uma base de dados muito mais completa, que nos permite definir e calcular essas propriedades para muitas combinações (vidros simples, duplos, triplos e com mais camadas e com ou sem película de baixa emissividade), tendo em consideração: o tipo de vidro, a espessura dos panos e o espaçamento e tipo de gás presente no sistema, figura 4.14. Para este estudo é muito importante conhecer as propriedades óticas do vidros, transmissão, reflexão e absorção da radiação solar.

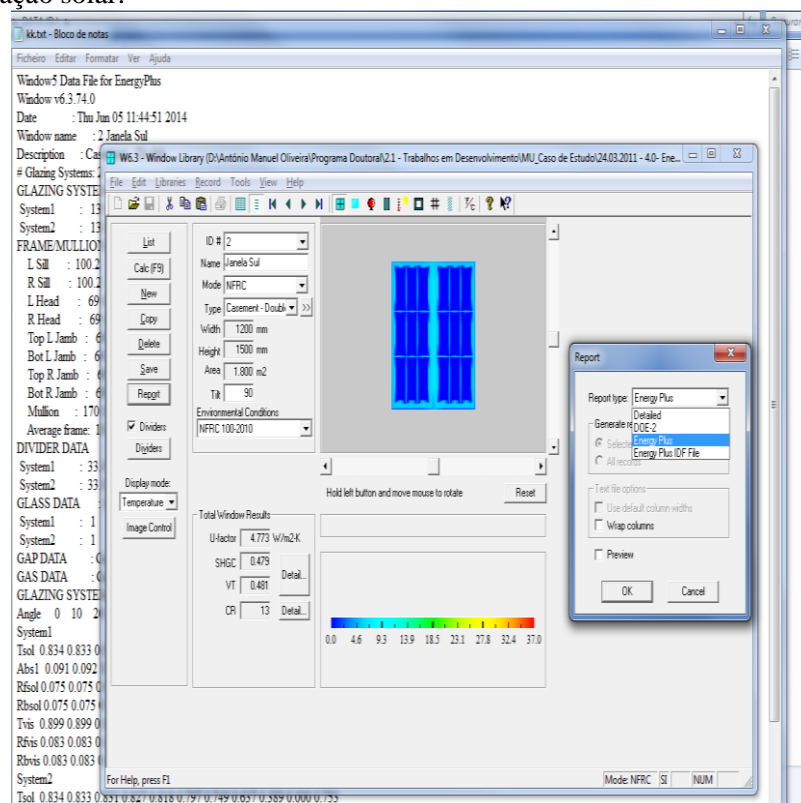


Fig.4.14. – Determinação das propriedades dos vãos envidraçados utilizando o programa WINDOW [112]



No quadro 4.14 são apresentadas as características dos vidros que foram utilizados nas simulações.

Quadro 4.14. – Características dos vidros utilizados nas simulações

Tipo de Vidro	Espeçura [mm]	$U_{\text{vidro}}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$g$ [-]	Transmissão Solar Direta [-]	Transmissão Luminosa [-]
Simples	6	Incolor	5,801	0,872	0,850
		Colorido na massa (Verde)	5,778	0,623	0,487
		LoE - Incolor (e2=0,2)	5,629	0,351	0,261
Duplo	6 + 10 + 6	Incolor + Ar + Incolor	2,774	0,779	0,726
	6 + 10 + 6	Colorido na massa Verde + Ar + Incolor	2,769	0,516	0,416
	6 + 10 + 6 LoE	Incolor + Ar + Incolor LoE	1,716	0,408	0,225

Para configurar os vidros duplos ou triplos no programa *DesignBuilder* é necessário juntar (construir) os vidros simples e definir a espessura do espaço de ar e o seu preenchimento (ar, argon, etc.).

A caixilharia tem como principal objetivo garantir a estanquidade e a operacionalidade dos vãos envidraçados, suportando os painéis de vidro que constituem a área envidraçada. Hoje em dia, o material mais utilizado nos caixilhos, em Portugal, é sem dúvida o alumínio, com ou sem corte térmico, embora a madeira continue ainda a ser bastante usada em reabilitação de edifícios antigos e o PVC é cada vez mais usado em novas construções.

O material utilizado para fabricar a caixilharia não é apenas importante para definir algumas das características físicas do vão envidraçado, tais como, espessura do caixilho, preocupações estruturais, peso e durabilidade, como também tem especial importância no desempenho térmico de todo o vão envidraçado. Atualmente, para se obter um isolamento térmico melhorado, são produzidos caixilhos híbridos, onde se conjugam dois ou mais materiais. Como foi referido no ponto § 2.3.3.2 do capítulo 2.

O programa *DesignBuilder* [11] também permite definir o tipo de caixilharia, podemos construir uma caixilharia, da mesma maneira como definimos uma parede, indicando o número de camadas e as propriedades dos materiais de cada camada, e calcula o respetivo coeficiente de transmissão térmica, em regime permanente. Nas simulações considerou-se a utilização de caixilharia de alumínio com 65 mm, com duas configurações, sem e com corte térmico.

O programa *DesignBuilder* também permite definir o tipo de proteção solar, a sua localização (interior ou exterior) e o seu tipo de funcionamento (15 opções: programável, em função da temperatura; radiação solar; etc.). Podemos configurar vários tipos de proteções solares (persianas, estores, lonas) e definir as suas propriedades físicas ( $U$ , fator solar ( $g$ ), etc.) e a sua localização em relação ao vão.

Para o presente estudo considerou-se que o dispositivo de proteção solar, quando for considerado, está ativo a 100%: na estação de aquecimento das (00:00 – 07:00 horas) e das (18:00 – 24:00 horas) e na estação de arrefecimento das (00:00 – 07:00 horas), das (09:00 – 18:00 horas) e das (22:00 – 24:00 horas). Quando for considerado, foram adotados dois tipos de dispositivos de proteção: estore veneziano de réguas metálicas em liga de alumínio, com 45° de inclinação em relação a um plano vertical paralelo ao vidro, aplicado pelo exterior (PSe) e pelo interior com 135° de inclinação em relação a um plano vertical paralelo ao vidro (PSi), afastados 0,20 m do vão.

No quadro 4.15 são apresentadas as propriedades dos caixilhos que foram utilizados nas simulações.

Quadro 4.15. – Tipo de caixilharia (Personalizada no DesignBuilder)

Tipo de Caixilho	Espessura [mm]	Constituição	$\alpha$ (cor)	$U_{\text{caixilho}}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]
Alumínio (Al) Sem corte térmico	65	2,00 mm alumínio 61,00 mm de ar 2,00 mm alumínio	0,60	9,089
Alumínio (Al) Com corte térmico	65	2,00 mm de alumínio 19,00 mm de ar 2,00 mm de alumínio 19,00 mm de ar 2,00 mm de alumínio 19,00 mm de ar 2,00 mm de alumínio	0,60	1,961

No quadro 4.16 são apresentadas as propriedades dos dispositivos de proteção que foram utilizados nas simulações.

Quadro 4.16. – Tipo de estore (definido no programa DesignBuilder de acordo com o REH [8])

Tipo de Proteção	Localização	Ângulo	Condutibilidade [W/m.°C]	Transmissão Solar Direta (g) [-]	Transmissão Luminosa [-]
Estore veneziano (régua metálica)	Exterior	45°	160	0,15	0,15
	Interior	135°	160	0,65	0,65

A fração envidraçada representa a relação entre a área envidraçada e a área do vão envidraçado, com a existência ou não de quadriculas. O programa *DesignBuilder* [11] permite definir a existência de quadriculas (*Dividers*) e a sua espessura e também permite definir a espessura e a localização da caixilharia, permitindo desse modo, definir a fração envidraçada.

Os vãos envidraçados são os principais responsáveis pela permeabilidade ao ar dos edifícios, com a admissão de ar não controlada (infiltrações) [22]. A permeabilidade ao ar dos vãos envidraçados depende da qualidade e localização destes, a sua análise será efetuada juntamente com a ventilação, como fazendo parte da ventilação constante ao longo do ano.

#### 4.4.2.4 Variáveis Relacionadas com o Clima

As figuras 4.15 a 4.18, ilustram as localizações escolhidas (Bragança, Porto e Évora) e mostram a variação (numa base horária) da respetiva temperatura do ar exterior e radiação solar (Radiação Global em Superfície Horizontal em Wh/m<sup>2</sup>). Os dados climáticos utilizados são os fornecidos pela ASHRAE *International Weather for Energy Calculations* (IWECC) [135], no formato EPW, disponíveis para utilização no programa *EnergyPlus*.



Fig.4.15. – Localização geográfica dos edifícios

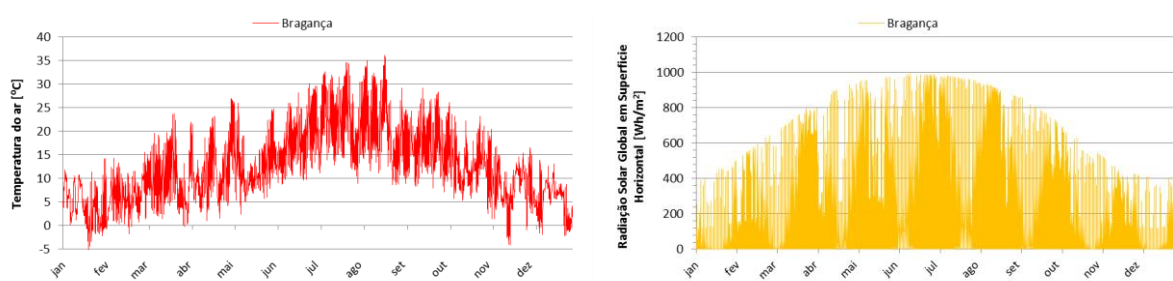


Fig.4.16. - Dados Climáticos para Bragança

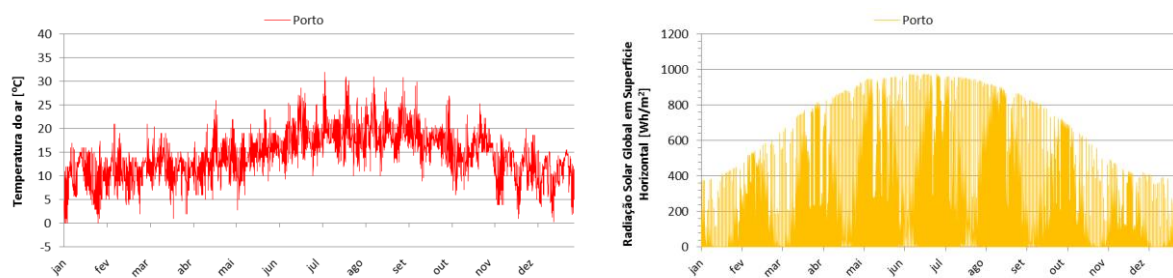


Fig.4.17. - Dados Climáticos para o Porto

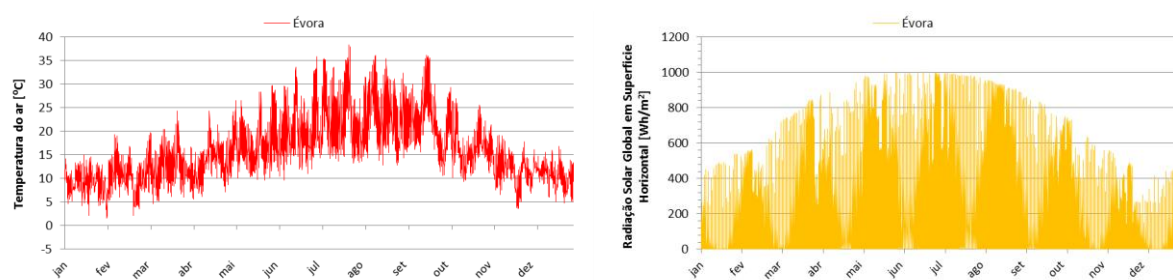


Fig.4.18. - Dados Climáticos para Évora

Para os locais indicados, foram utilizados os valores mensais da temperatura do solo a 0,5 m e a 2,0 m de profundidade correspondentes, também retirados dos respetivos ficheiros climáticos, que disponibilizam também valores para 4 m, quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Valores mensais da temperatura do solo a 0,5 m e a 2,0 m de profundidade

Temperatura do solo a 0,5 m de profundidade [°C]												
Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bragança	5,2	4,5	5,8	7,7	12,8	16,8	19,4	20,2	18,9	15,8	11,7	7,9
Porto	10,2	9,8	10,5	11,6	14,6	16,8	18,4	18,8	18,0	16,3	13,9	11,7
Évora	10,0	9,4	10,4	12,0	16,2	19,4	21,5	22,2	21,1	18,6	15,2	12,1
Temperatura do solo a 2 m de profundidade [°C]												
Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bragança	7,8	6,5	6,8	7,8	11,3	14,4	16,8	18,2	17,9	16,1	13,2	10,3
Porto	11,7	11,0	11,1	11,7	13,7	15,4	16,9	17,6	17,5	16,5	14,8	13,1
Évora	12,0	11,0	11,3	12,1	14,9	17,4	19,4	20,5	20,3	18,9	16,6	14,1

O programa *EnergyPlus* [10] disponibiliza um programa auxiliar (*Utilities - Slab*) que em função da geometria do edifício (volume e perímetro) e características da envolvente (resistência térmica da parede exterior e do pavimento em contato com o solo) e do valor da temperatura média mensal interior de controlo, permite determinar a temperatura do solo para um dado clima (utiliza o ficheiro climático).

Nas simulações foram utilizados os valores da temperatura do solo retirados dos respetivos ficheiros climáticos a 2,0 m de profundidade.

Quadro 4.18. – Estação de arrefecimento e de aquecimento para os climas estudados

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estação de Arrefecimento												
Bragança												
Porto												
Évora												
Estação de Aquecimento												
Bragança												
Porto												
Évora												

O quadro 4.18 apresenta a estação de aquecimento e a estação de arrefecimento para os climas estudados. De acordo com o REH [8] a duração da estação de aquecimento (i) para os climas estudados, com base na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, São as seguintes: Bragança – 7,3 meses; Porto – 6,2 meses e Évora – 5,3 meses. E a duração da estação de arrefecimento (v) é de 4 meses para todas as localizações.

## 4.4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA DE SENSIBILIDADE - PRELIMINAR

## 4.4.3.1. Introdução

Neste ponto são apresentados resultados preliminares para analisar a sensibilidade relativa aos elementos que constituem os vãos envidraçados, o tipo de ganhos internos e o tipo de ventilação de um dos modelos dos edifícios entretanto criados, através da utilização do programa *DesignBuilder* [11], com a finalidade de justificar as opções adotadas em relação às opções relativas às variáveis que foram escolhidas para análise no ponto §4.4.1. deste capítulo, nomeadamente:

- Tipo de vidro (V);
- Tipo de caixilho (Cx);
- Tipo de proteção solar (Ps);
- Tipo de ganhos internos (Gi);
- Tipo de ventilação (Ra).

O caso em análise corresponde ao modelo do edifício, localizado em Bragança, em que o espaço a simular tem o seguinte cenário: 6,00 m de fachada; 6,00 m de profundidade (Prof2); a área dos vãos envidraçados é 15% da área de pavimento (Ae15); inércia térmica forte (F); sem climatização (Ctis); fachada (envolvente exterior) com 3,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{\text{parede}}=3$  cm) e pintada em branco (C); cobertura com 6,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{\text{cobertura}}=6$  cm) com revestimento exterior claro e o vão envidraçado está orientado a Sul e não tem sombreamento por elementos exteriores (SEs).

Como o desempenho de todas estas variáveis de algum modo está interligado, para a análise de uma é sempre necessário definir as outras. Então, em cada análise é indicada a opção escolhida para às outras variáveis, a sua caracterização é apresentada aquando da análise da respetiva variável.

## 4.4.3.2. Tipo de Vidro (V)

Nas figuras 4.19 a 4.21 apresenta-se a variação média diária da temperatura do ar no espaço A.1 (piso 1 – nível intermédio, com duas fachadas e com vão envidraçado na fachada orientada a Sul), ao longo do ano e para duas semanas de inverno e de verão, para comparar a utilização de vários tipos de vidro, caracterizados no quadro 4.19. Nas figuras 4.22 a 4.24 apresenta-se uma análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano para todos os espaços a simular em função do tipo de vidro. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura média diária exterior.

Quadro 4.19. – Características do vidro

Tipo de Vidro	Espessura		$U_{\text{vidro}}$	$g$	Transmissão Solar Direta	Transmissão Luminosa
	[mm]		[W/m <sup>2</sup> .°C]	[-]	[-]	[-]
Simples	V1	6	Incolor	5,801	0,872	0,850
	V2		Colorido na massa (verde)	5,778	0,623	0,487
	V3		LoE - Incolor (e2=0,2)	5,629	0,351	0,261
Duplo	V4	6 + 10 + 6	Incolor + Ar + Incolor	2,774	0,779	0,726
Triplo	V5	6 + 10 + 6 + 5 + 4	Incolor + Ar + Incolor + Ar + Incolor	2,037	0,710	0,645
						0,705

Para a presente análise considerou-se para a taxa de ventilação a opção (Ra2 –  $[0,6 \text{ h}^{-1}/2,0 \text{ h}^{-1}]$ ) durante todo o ano, para o dispositivo de proteção a opção (Ps1 – sem proteção), para o caixilho a opção (Cx2 – alumínio com corte térmico) e para os ganhos internos a opção (Gi1 – um ocupante).

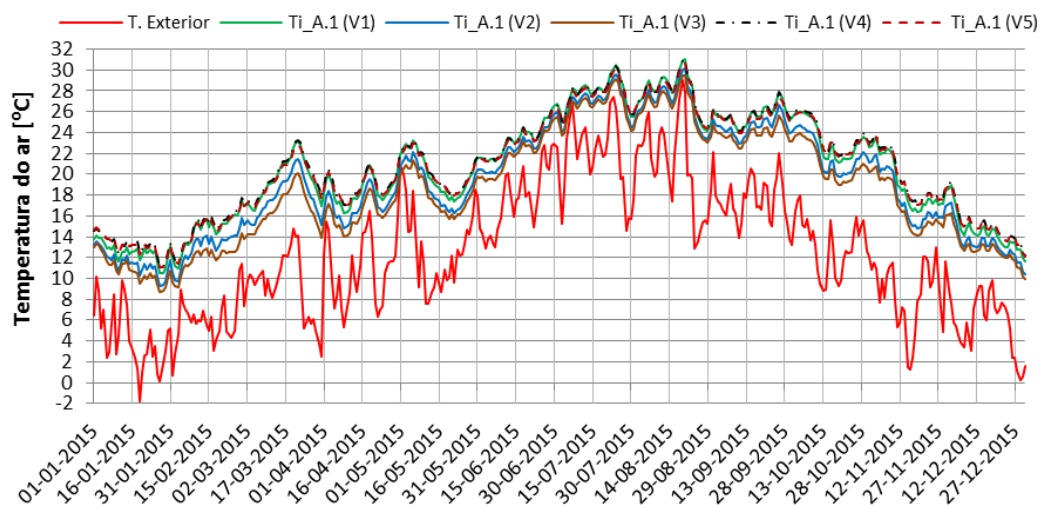


Fig.4.19. – Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço (A.1), para vários tipos de vidro

Ao observar figura 4.19 podemos verificar que o vidro V4 (vidro duplo) e o vidro V5 (vidro triplo) apresentam valores muito semelhantes para a temperatura média diária do ar ao longo do ano.

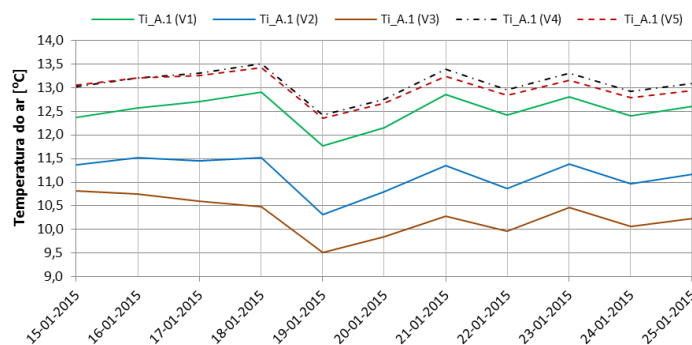


Fig.4.20. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), para vários tipos de vidro

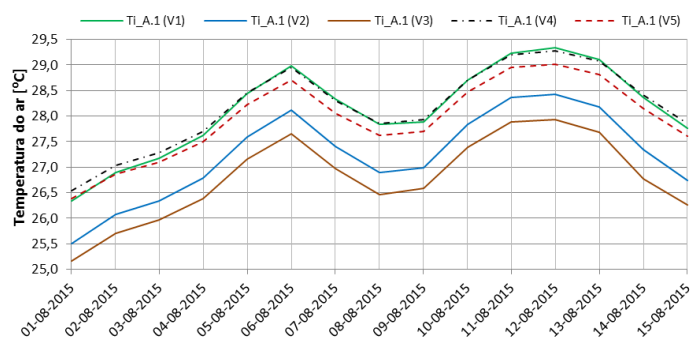


Fig.4.21. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), para vários tipos de vidro

tipos de vidro

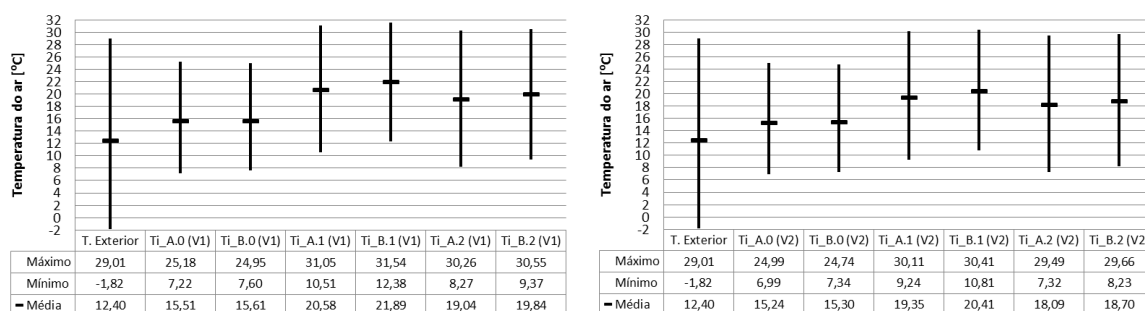


Fig.4.22. – Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V1 à esquerda e vidro V2 à direita

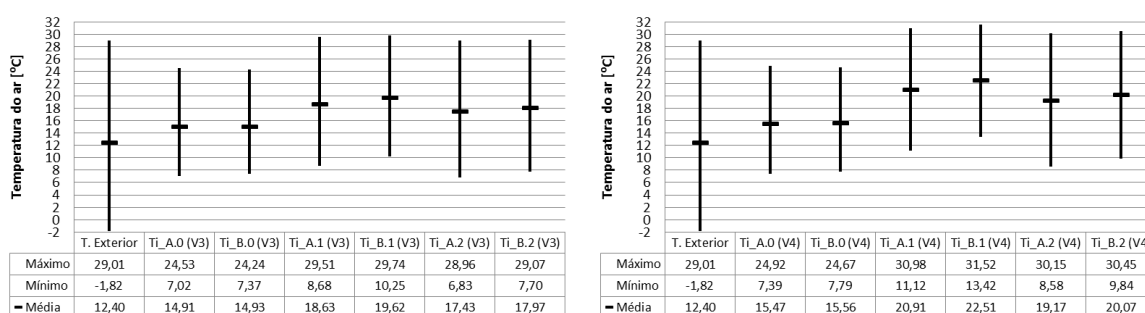


Fig.4.23. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V3 à esquerda e vidro V4 à direita

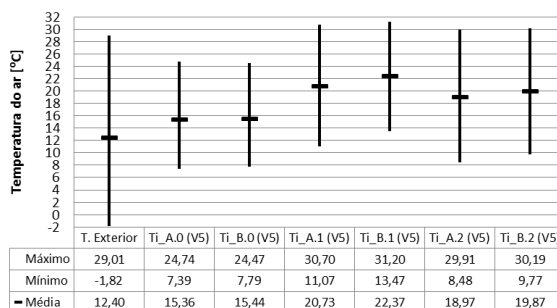


Fig.4.24. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: vidro V5

Nos espaços em contato com o solo (A.0 e B.0) não se verifica uma variação da temperatura do ar muito significativa para os vários tipos de vidro analisados.

Ao observar as figuras com variação da temperatura média diária do ar, no espaço A.1 verifica-se um aumento desta, quando se substitui o vidro V3 (simples - LoE – incolor) pelo vidro V4 (duplo – 6 (incolor) +4 (ar) +6 (incolor)). Verifica-se um aumento da temperatura média diária do ar interior, sendo mais significativa no inverno e na meia estação, chegando a apresentar uma diferença de mais ou menos 2 °C.

Com a utilização do vidro simples V2 (colorido na massa - verde) e V3 (LoE – incolor) os valores da temperatura do ar interior são inferiores tanto no inverno como no verão, sendo menores para o V3 e a maior diferença regista-se no inverno e na meia estação.

A diferença entre a utilização de vidro simples e vidros duplos é muito significativa, sendo maior no inverno, principalmente quando se utilizam vidros com tratamento (coloridos ou com baixa emissividade) em relação ao vidro incolor a diferença é menos expressiva. Já a diferença entre a utilização de vidro duplo e triplo não é muito significativa.

Comparando a utilização de vidro simples (V1) e de vidro duplo (V4) podemos observar que a variação da temperatura média diária do ar no inverno apresenta valores mais elevados quando se utiliza vidro duplo, no verão apresentam valores muito semelhantes, a utilização de vidro duplo permite obter melhores condições de conforto térmico e consequente redução das necessidades energéticas para climatização (aquecimento).

Assim sendo, dos tipos de vidro analisados, optou-se pela utilização de vidro simples (V1 e V2) e de vidro duplo (V4).

#### 4.4.3.3. Tipo de Caixilho (Cx)

Nas figuras 4.25 a 4.27 apresenta-se a variação da temperatura média diária do ar no espaço A.1 (pisso 1 – nível intermédio, com duas fachadas e com vão envidraçado na fachada orientada a Sul), ao longo do ano e para duas semanas de inverno e de verão, para comparar a utilização de vários tipos de caixilho, caracterizados no quadro 4.20. Nas figuras 4.28 e 4.29 apresenta-se uma análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano para todos os espaços a simular em função do tipo de caixilho. É ainda indicada nos gráficos a variação média diária da temperatura exterior.

Para a presente análise considerou-se para a taxa de ventilação a opção (Ra2 –  $[0,6 \text{ h}^{-1}/2,0 \text{ h}^{-1}]$ ), para o dispositivo de proteção a opção (Ps1 – sem proteção), para o vidro a opção (V4 – vidro duplo – 6 (incolor) +4 (ar) +6 (incolor)) e para os ganhos internos a opção (Gi1 – um ocupante).

Ao observar figura 4.25 podemos verificar que todos os tipos de caixilho apresentam valores muito semelhantes para a temperatura média diária do ar ao longo do ano.

Quadro 4.20. – Características do caixilho

Tipo de Caixilho		Espessura [mm]		Constituição	Cor $\alpha$	$U_{\text{caixilho}}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	
Metálica - Alumínio Sem corte térmico	Cx1	65	2,00 mm alumínio			0,60	9,089
			61,00 mm de ar				
			2,00 mm alumínio				
Metálica - Alumínio Com corte térmico	Cx2	65	2,00 mm de alumínio			0,60	1,852
			19,00 mm de ar				
			2,00 mm de alumínio				
			19,00 mm de ar				
			2,00 mm de alumínio				
			19,00 mm de ar				
PVC	Cx3	65	2,00 mm PVC			0,40	1,703
			61,00 mm de ar				
			2,00 mm PVC				
Madeira	Cx4	65	65 mm de madeira densa			0,60	3,538



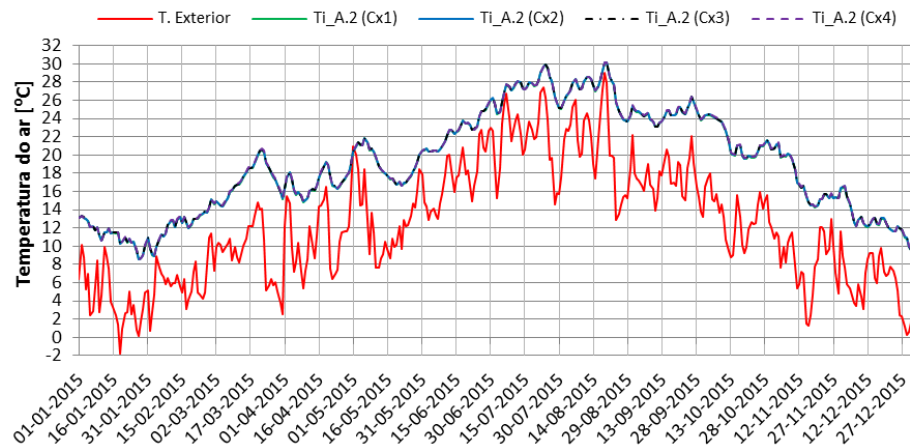


Fig.4.25. - Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho

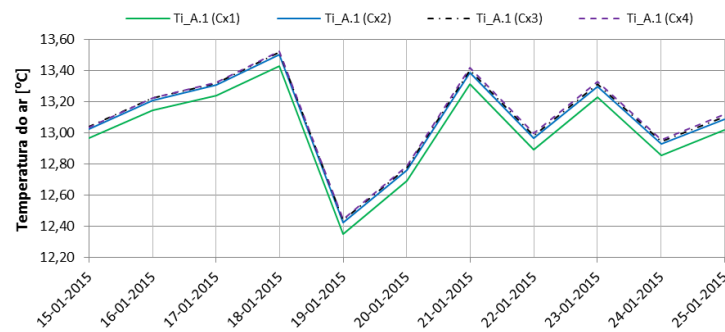


Fig.4.26. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho

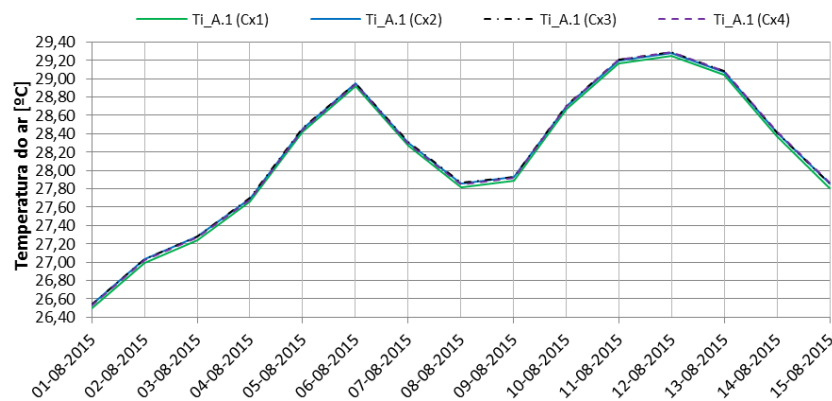


Fig.4.27. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), para vários tipos de caixilho

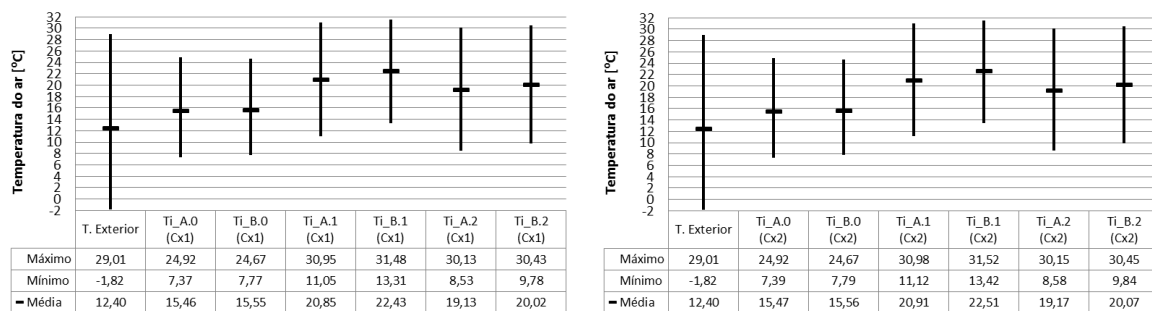


Fig.4.28 – Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: caixilho Cx1 à esquerda e o caixilho Cx2 à direita

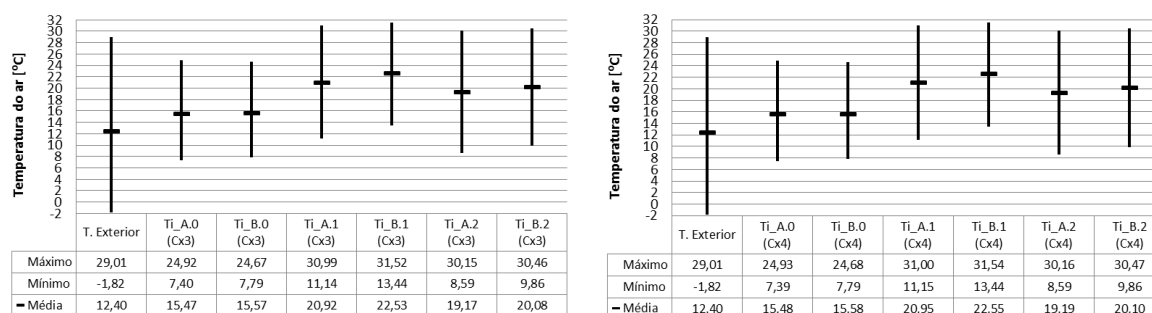


Fig.4.29. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: caixilho Cx3 à esquerda e o caixilho Cx4 à direita

Observa-se que os resultados obtidos para os tipos de caixilho analisados apresentam diferenças mínimas, ao nível das centésimas, como podemos verificar pelas figuras. Salientando que a temperatura média diária do ar interior aumenta ligeiramente, ao nível das centésimas, com a melhoria da qualidade do caixilho, ao comparar a caixilharia em alumínio sem e com corte térmico. Quando comparamos caixilhos com melhor qualidade, com coeficientes de transmissão térmica inferiores, a variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano é muito reduzida, sendo maior no mês de janeiro.

Para o trabalho a desenvolver, optou-se pela utilização de dois tipos de caixilho, caixilho em alumínio sem e com corte térmico.

#### 4.4.3.4. Tipo de Proteção Solar (Ps)

Nas figuras 4.30 a 4.32 apresenta-se a variação da temperatura média diária do ar no espaço A.1 (pisso 1 – nível intermédio, com duas fachadas e com vão envidraçado na fachada orientada a Sul), ao longo do ano e para duas semanas de inverno e de verão, para comparar a utilização de vários tipos de proteções solares, caracterizados no quadro 4.21. Nas figuras 4.33 a 4.36 apresenta-se uma análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano para todos os espaços a simular em função do tipo de proteção solar. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura média diária exterior.

Quadro 4.21. – Características dos dispositivos de proteção solar definidos no DesignBuilder de acordo com o REH

Tipo de Proteção	Localização		Ângulo [°]	Condutibilidade [W/m.°C]	Transmissão Solar Direta (g) [-]	Transmissão Luminosa [-]
Sem proteção	Ps1	-	-	-	-	-
Estore veneziano régua metálica <sup>(1)</sup>	Ps2	Exterior	90 <sup>(2)</sup>	160	0,09	0,09
	Ps3		45	160	0,15	0,15
	Ps4	Interior	90 <sup>(2)</sup>	160	0,60	0,60
	Ps5		135	160	0,65	0,65
Lona Opaca <sup>(1)</sup>	Ps6	Exterior	-	0,10	0,06	0,06
	Ps7	Interior	-	0,10	0,46	0,46

(1) Cor média

(2) Lâminas na posição vertical

Para a presente análise considerou-se para a taxa de ventilação a opção (Ra2 – [0,6 h<sup>-1</sup>/2,0 h<sup>-1</sup>]), para o caixilho a opção (Cx2 – alumínio com corte térmico), para o vidro a opção (V4 – vidro duplo – 6 (incolor) +4 (ar) +6 (incolor)) e para os ganhos internos a opção (Gi1 – um ocupante). Para a presente análise considerou-se que o dispositivo de proteção solar está ativo a 100%, quando for considerado: na estação de aquecimento das (00:00 – 07:00 horas) e das (18:00 – 24:00 horas) e na estação de arrefecimento das (00:00 – 07:00 horas), das (09:00 – 18:00 horas) e das (22:00 – 24:00 horas).

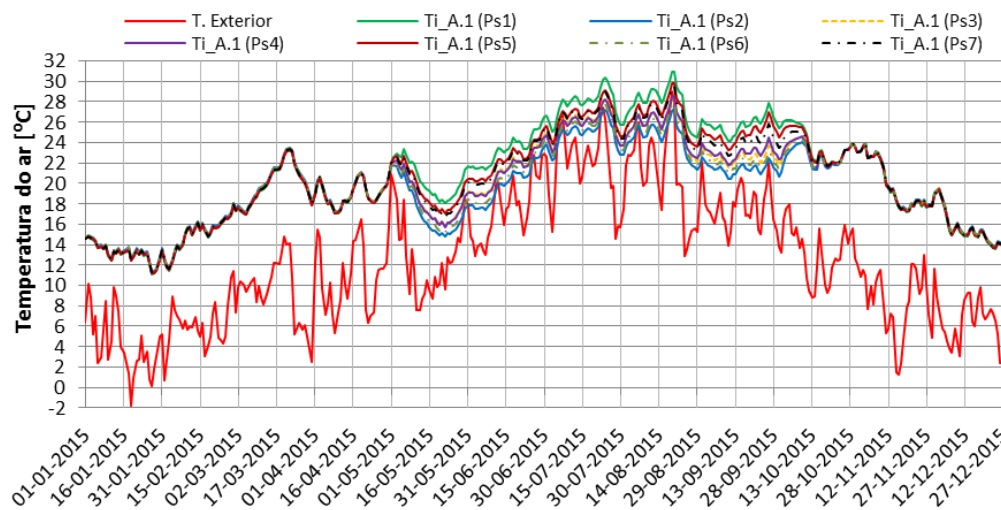


Fig.4.30. - Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar

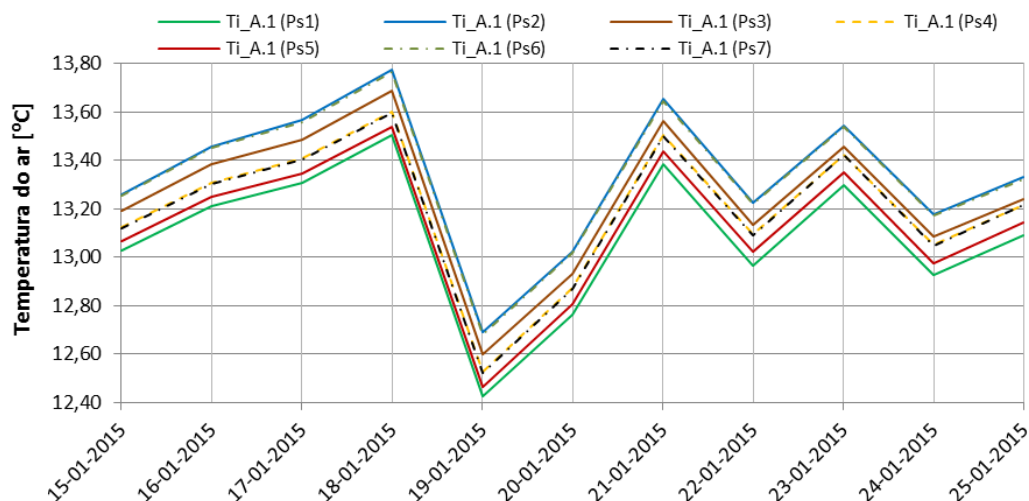


Fig.4.31. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar

Ao observar figura 4.31 podemos verificar que as proteções solares Ps2 e Ps6, respetivamente, estore veneziano de réguas metálicas localizado pelo exterior com as lâminas posição vertical e Lona Opaca localizado pelo exterior) e as proteções solares Ps4 e Ps7, respetivamente, estore veneziano de réguas metálicas localizado pelo interior com as lâminas posição vertical e Lona Opaca localizado pelo interior, apresentam valores semelhantes para a temperatura média diária do ar.

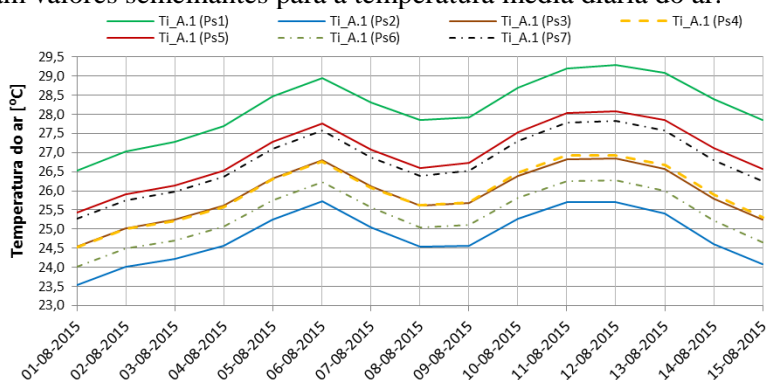


Fig.4.32. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), em função do tipo de proteção solar

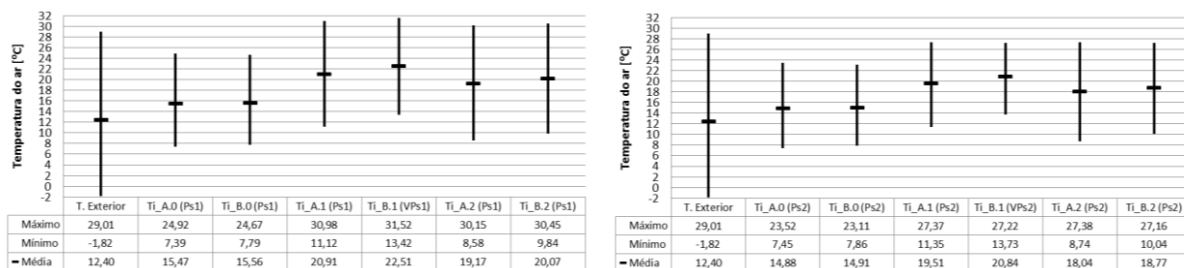


Fig.4.33. – Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps1 à esquerda e proteção solar Ps2 à direita

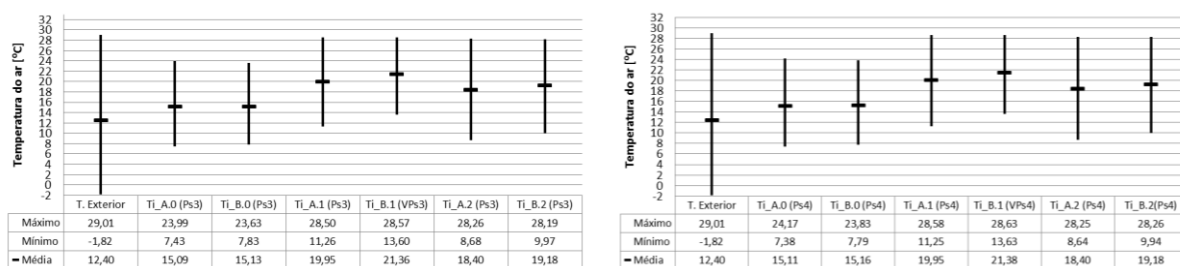


Fig.4.34. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps3 à esquerda e proteção solar Ps4 à direita

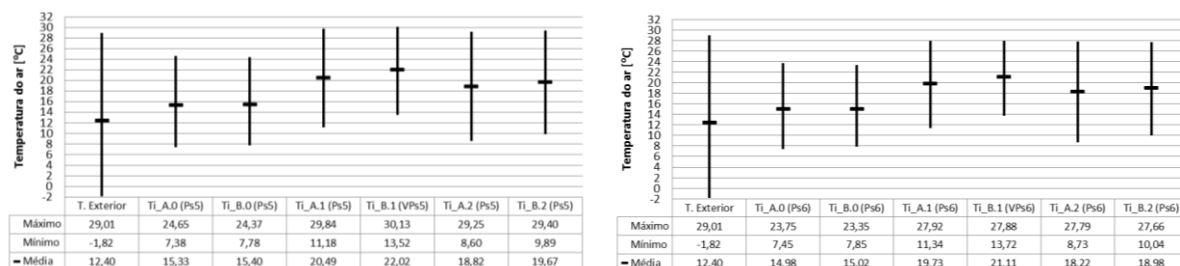


Fig.4.35. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps5 à esquerda e proteção solar Ps6 à direita

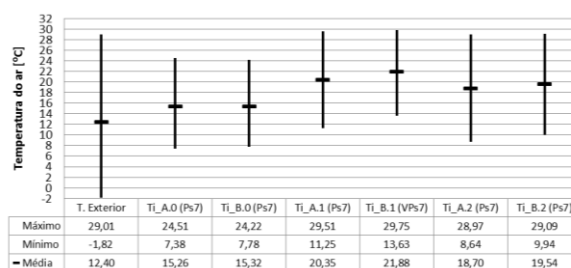


Fig.4.36. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: proteção solar Ps7

Observa-se que a variação da temperatura média diária do ar interior é inferior na estação de aquecimento, uma vez que os estores só estão ativos durante a noite. Em relação à estação de arrefecimento a variação da temperatura média diária do ar interior já é significativa sendo maior em relação à situação Ps1 (sem proteção), sendo mais eficiente quando a proteção é colocada pelo exterior Ps2 (estore veneziano de réguas metálicas localizado pelo exterior com as lâminas posição vertical). Já na estação de aquecimento a variação da temperatura média diária do ar interior é mínima, visto que os estores estão ativos durante a noite, contribuindo os estores para aumentar a resistência térmica do vão envidraçado, sendo mais eficiente quando a proteção é colocada pelo exterior Ps2 (estore veneziano de réguas metálicas localizado pelo exterior com as lâminas posição vertical) e Ps6 (lona opaca localizada pelo exterior).

Em relação à localização dos dispositivos de proteção solar, observa-se que os resultados obtidos para a temperatura média diária do ar interior são superiores na estação de aquecimento, quando os estores são colocados pelo exterior, sendo inferiores na estação de arrefecimento. Sendo essa diferença maior na estação de arrefecimento.

Em relação ao tipo de dispositivo de proteção solar Ps2 Ps6, respetivamente, estore veneziano de réguas metálicas quando as lâminas têm um ângulo de 90° e Lona Opaca localizada pelo exterior,

observa-se que os resultados obtidos para a temperatura média diária do ar interior são semelhantes, sendo que a maior diferença se regista na estação de arrefecimento.

Em relação à inclinação das lâminas dos estores venezianos, observa-se que os resultados obtidos para a temperatura média diária do ar interior são melhores (superiores na estação de aquecimento e inferiores na estação de arrefecimento), quando as lâminas têm um ângulo de 90°, independentemente de serem colocados pelo interior ou pelo exterior. Sendo que a maior diferença se regista na estação de arrefecimento.

Por isso, para o trabalho a desenvolver, optou-se pela utilização como dispositivo de proteção solar os estores venezianos com lâminas metálicas com 45° (135°), respetivamente, pelo exterior e pelo interior. Não tendo apenas em consideração o desempenho dos dispositivos de proteção solar, mas também de forma a garantir a iluminação natural dos espaços, principalmente durante a estação de arrefecimento.

#### 4.4.3.5. TIPO DE GANHOS INTERNOS (Gi)

Nas figuras 4.37 a 4.39 apresenta-se a variação da temperatura média diária do ar no espaço A.1 (pisso 1 – nível intermédio, com duas fachadas e com vão envidraçado na fachada orientada a Sul), ao longo do ano e para duas semanas de inverno e de verão, para comparar a utilização de vários tipos de ganhos internos, caracterizados no quadro 4.22. Nas figuras 4.40 a 4.42 apresenta-se uma análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano para todos os espaços a simular em função do tipo de ganhos internos. É ainda indicada nos gráficos a variação média diária da temperatura exterior.

Quadro 4.22. – Caracterização dos ganhos internos

Ocupação			Iluminação			Equipamento
Número de Ocupantes	Densidade [ocupantes/m <sup>2</sup> ]	Perfil	DPI [(W/m <sup>2</sup> )/100lux]	[lux]	Perfil <sup>(3)</sup>	[W/m <sup>2</sup> ]
Gi1	1	0,050 <sup>(1)</sup>	2,0	200	i: (07 – 09)100% (18 – 22)100%	-
Gi2	2	0,10 <sup>(1)</sup>			(22 – 24)50%	
Gi3	4	0,20 <sup>(1)</sup>			v: (07 – 08)100% (20 – 22)100%	
Gi4	6	0,30 <sup>(1)</sup>			(22 – 24)50%	
Gi5	2	0,10 <sup>(2)</sup>	2,8	500	i: (09 – 10)100% (10 – 15)50%	5 <sup>(4)</sup>
Gi6	4	0,20 <sup>(2)</sup>			(15 – 18)100% v: (09 – 10)50% (10 – 15)25% (15 – 18)50%	

(1) Atividade metabólica de 80,5 W/ocupante.

(2) Atividade metabólica de 112,0 W/ocupante.

(3) Perfil diário da iluminação do edifício de habitação (i – Estação de aquecimento e v – Estação de arrefecimento).

(4) Considerou-se a existência de equipamento informático.

Para a presente análise considerou-se para a taxa de ventilação a opção (Ra2 –  $[0,6 \text{ h}^{-1}/2,0 \text{ h}^{-1}]$ ), para o dispositivo de proteção a opção (Ps1 – sem proteção), para o vidro a opção (V4 – vidro duplo – 6 (incolor) +4 (ar) +6 (incolor)) e para o caixilho a opção (Cx2 – alumínio com corte térmico).

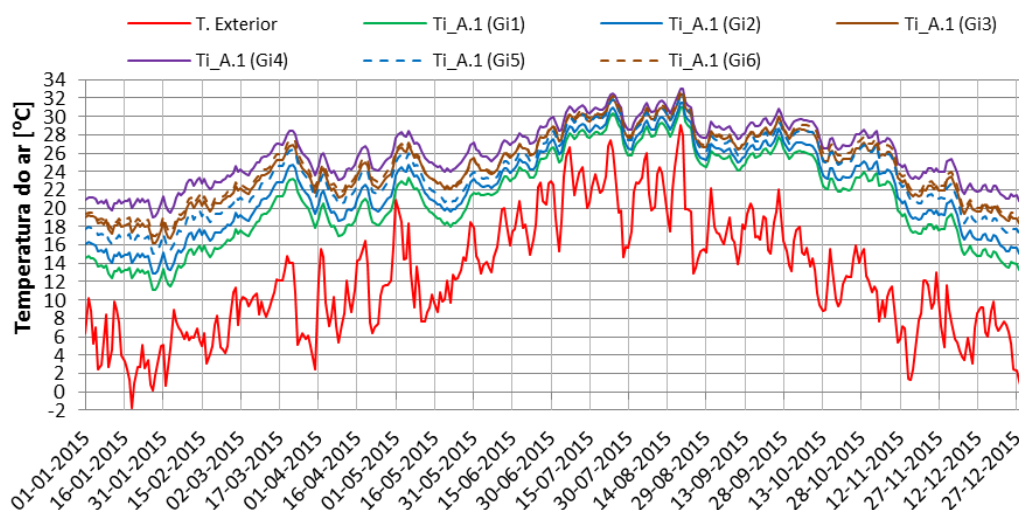


Fig.4.37. - Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos

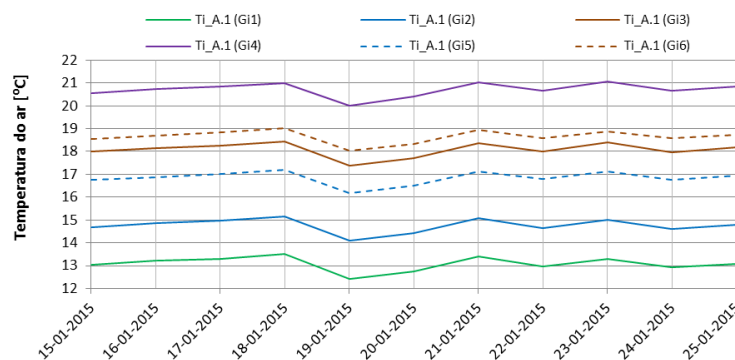


Fig.4.38. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos

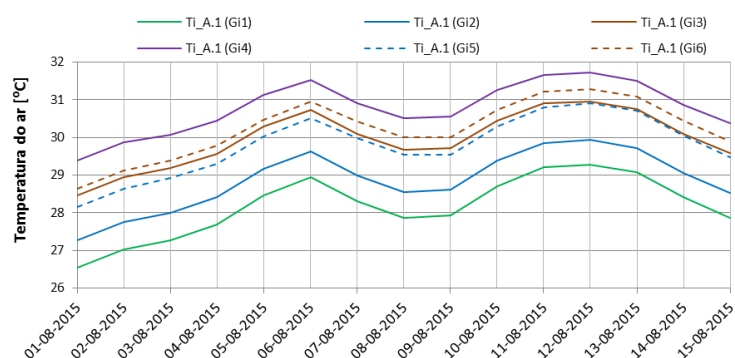


Fig.4.39. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de agosto no espaço (A.1), em função do tipo de ganhos internos

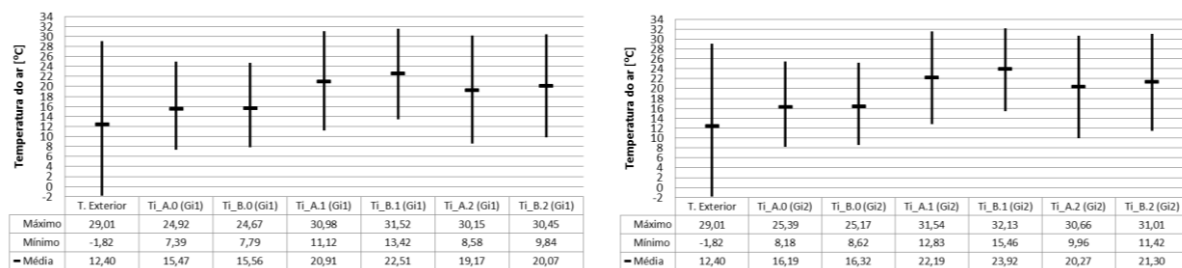


Fig.4.40. – Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi1 à esquerda e o ganho interno Gi2 à direita

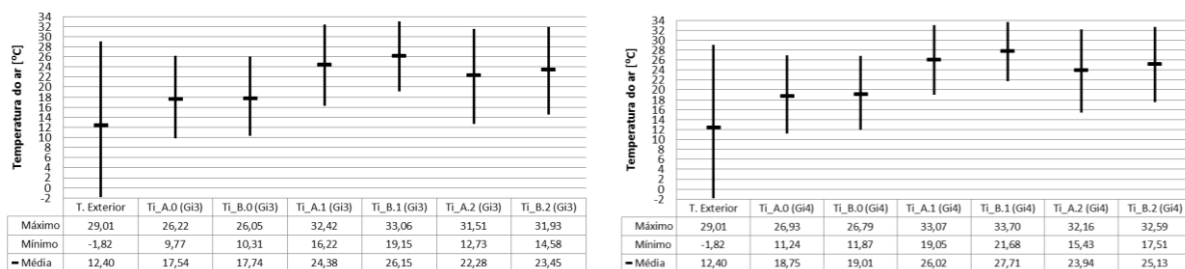


Fig.4.41. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi3 à esquerda e o ganho interno Gi4 à direita

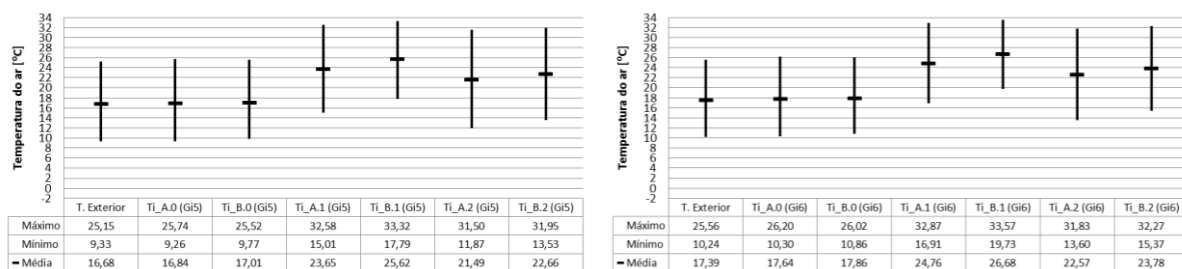


Fig.4.42. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ganho interno Gi5 à esquerda e o ganho interno Gi6 à direita

Observa-se que a temperatura média diária do ar interior aumenta proporcionalmente com o acréscimo da densidade de ocupação. Para grande parte da estação de aquecimento para as opções Gi3, Gi4, Gi5 e Gi6 já teríamos uma temperatura média diária do ar superior a 18 °C, valor recomendado pelo REH [8]. Para todas as opções na estação de arrefecimento os valores obtidos para a temperatura do ar interior no mês de agosto são superiores a 25 °C, valor recomendado pelo REH, sendo para as opções Gi3, Gi4, Gi5 e Gi6 superiores a 28 °C.

Ao alterar a ocupação de habitação (noturna) para serviços (diurna e com equipamento) verificamos que as opções Gi4 e Gi6 apresentam valores muito próximos, já para as opções Gi3 e Gi5 o aumento da temperatura do ar interior é maior.

Por isso, para o trabalho a desenvolver, foi adotada a opção Gi1 (um ocupante), para se obter os ganhos internos mínimos, permitindo desta forma analisar o desempenho dos elementos construtivos do edifício, principalmente a contribuição dos vãos envidraçados.



## 4.4.3.6. Tipo de Ventilação (Ra)

Nas figuras 4.43 a 4.45 apresenta-se a variação média diária da temperatura do ar no espaço A.1 (piso 1 – nível intermédio, com duas fachadas e com vão envidraçado na fachada orientada a Sul), ao longo do ano e para duas semanas de inverno e de verão, para comparar a utilização de vários tipos de ventilação, caracterizados no quadro 4.23. Nas figuras 4.46 a 4.49 apresenta-se uma análise estatística da variação média diária da temperatura do ar ao longo do ano para todos os espaços a simular em função do tipo de ventilação. É ainda indicada nos gráficos a variação média diária da temperatura exterior.

Quadro 4.23. – Caracterização da ventilação

	Tipo de ventilação	
	Infiltrações [ $\text{h}^{-1}$ ]	Ventilação noturna [ $\text{h}^{-1}$ ] <sup>(1)</sup>
Ra1	0,6	0,0
Ra2	0,6	2,0
Ra3	0,4	0,0
Ra4	0,4	2,0
Ra5	1,2	0,0
Ra6	1,2	2,0
Ra7	0,2 <sup>(2)</sup>	0,0

(1) A ventilação noturna resulta da abertura parcial dos vãos envidraçados durante a noite, das 18:00 às 24:00 horas, durante a estação de arrefecimento.

(2) De acordo com o REH este valor não é admissível como ventilação única.

Para a presente análise considerou-se para o dispositivo de proteção a opção (Ps1 – sem proteção), para o vidro a opção (V4 – vidro duplo – 6 (incolor) +4 (ar) +6 (incolor)), para o caixilho a opção (Cx2 – alumínio com corte térmico) e para os ganhos internos a opção (Gi1 – um ocupante).

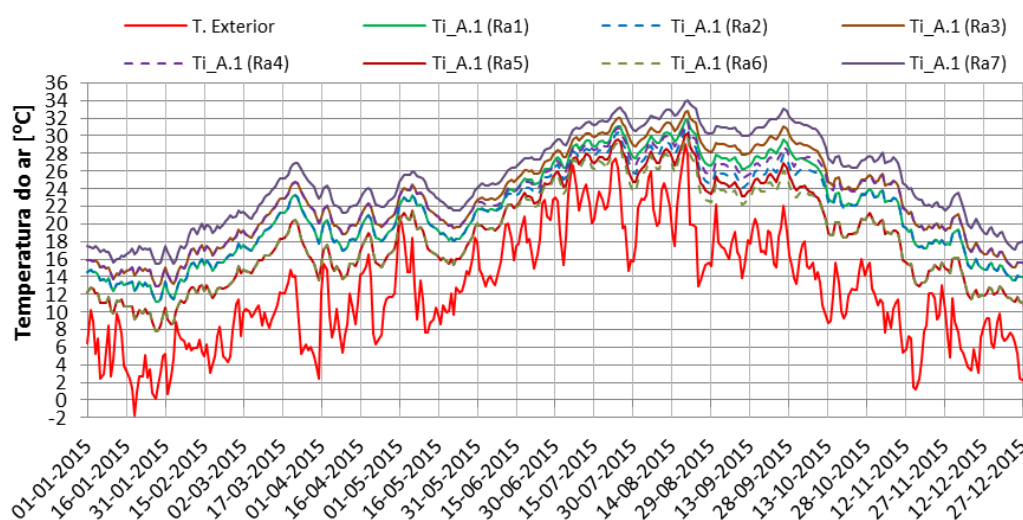


Fig.4.43. - Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação

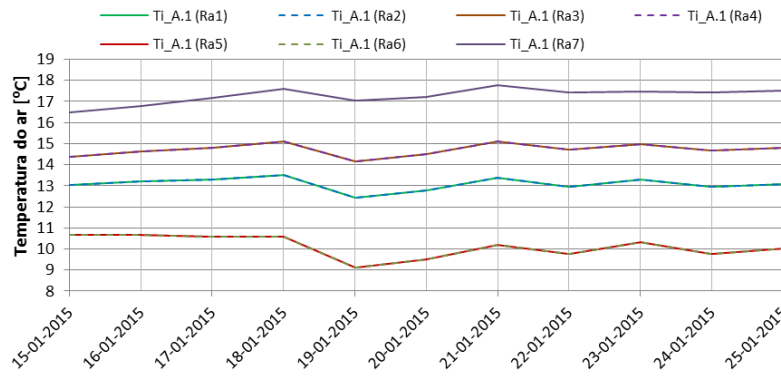


Fig.4.44. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação

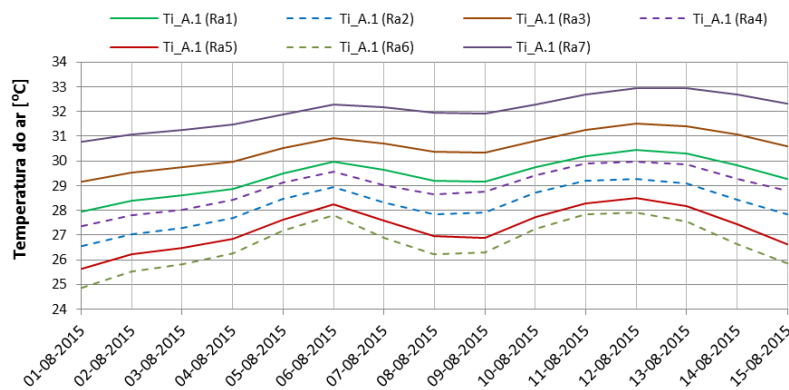


Fig.4.45. - Variação da temperatura média diária do ar em duas semanas de janeiro no espaço (A.1), em função do tipo de ventilação

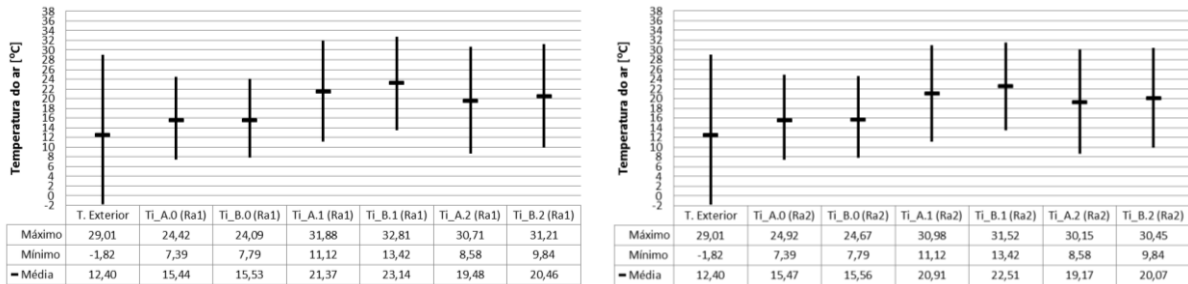


Fig.4.46 – Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra1 à esquerda e ventilação Ra2 à direita

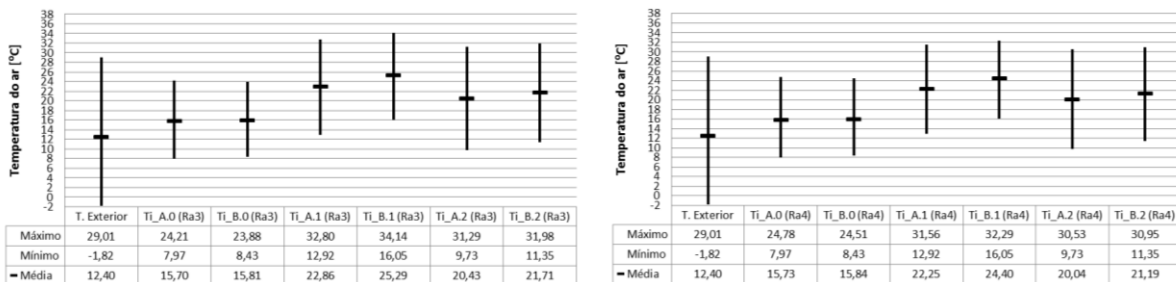


Fig.4.47. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra3 à esquerda e ventilação Ra4 à direita

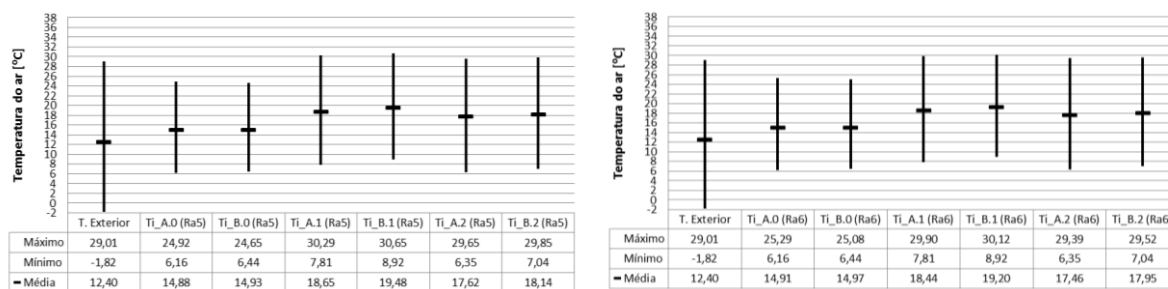


Fig.4.48. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra5 à esquerda e ventilação Ra6 à direita

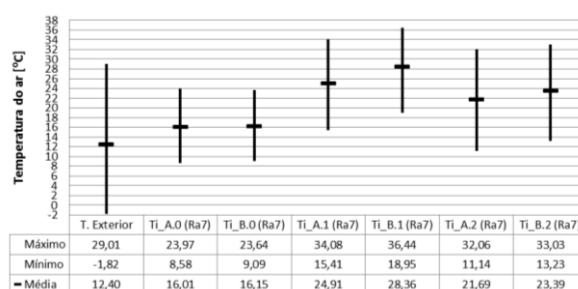


Fig.4.49. - Análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular: ventilação Ra7

Como a ventilação noturna só funciona na estação de arrefecimento, durante a estação de aquecimento a variação da temperatura média diária do ar interior é igual, para a situação sem e com ventilação noturna.

Observa-se que a temperatura média diária do ar interior varia proporcionalmente com a variação da taxa de ventilação. Quando temos uma taxa de ventilação menor, o que implica menos perdas de calor, logo temperatura média diária do ar interior é maior, o que pode ser benéfico para a estação de aquecimento mas negativo para a estação de arrefecimento. Mas não nos podemos esquecer que os edifícios têm de ser ventilados e teremos que garantir uma taxa mínima de ventilação de  $0,4 \text{ h}^{-1}$ , definida pelo REH.

Por isso, para o presente trabalho, adotou-se a utilização das opções Ra1 e Ra2, respetivamente,  $[0,6 \text{ h}^{-1}/0,0 \text{ h}^{-1}]$  e  $[0,6 \text{ h}^{-1}/2,0 \text{ h}^{-1}]$ , para se obter uma taxa de ventilação constante durante todo o ano e garantir a ventilação noturna durante a estação de arrefecimento. Permitindo desta forma analisar o desempenho dos vãos envidraçados.

#### 4.4.3.7. Conclusões

Ao analisar os resultados preliminares para aferir da sensibilidade relativa aos elementos que constituem os vãos envidraçados, o tipo de ganhos internos e o tipo de ventilação apresentados conclui-se que:

- Ao observar as figuras com a análise estatística da variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano nos espaços a simular, o espaço em contato com o solo (B.0) apresenta temperaturas do ar inferiores e que o espaço intermédio (B.1) apresenta temperaturas superiores;
- Dos elementos que constituem o vão envidraçado analisado, foram as opções consideradas em relação ao tipo de proteção solar, que resultaram numa variação maior da temperatura do ar

interior, seguindo-se as opções consideradas em relação ao tipo de vidro. Já as referentes ao tipo de caixilho foram as que resultaram numa variação menor da temperatura do ar interior;

- O valor dos ganhos internos provaram ter uma grande influência na variação da temperatura do ar interior;
- Nas opções consideradas em relação ao tipo de ventilação, verificou-se uma variação expressiva da temperatura do ar interior.

#### 4.4.4. FUNÇÕES DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

##### 4.4.4.1. Introdução

A consideração de funções de avaliação do desempenho resulta da necessidade de definir critérios para a avaliação do desempenho do edifício em função das variáveis em estudo. Pode-se recorrer a funções matemáticas ou definir limites de acordo com normas e regulamentação. O seu cálculo implica o recurso a ferramentas de simulação dinâmica do desempenho anual do edifício.

A avaliação do desempenho do edifício, mais concretamente dos espaços em estudo, será conseguida através de funções que permitam caracterizar:

- O conforto térmico no interior dos edifícios, tendo em consideração os limites definidos no REH [8] para a temperatura do ar;
- O conforto térmico local devido à existência do vão envidraçado, tendo em consideração a diferença, em valor absoluto, entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro.

Foram definidos dois grupos de Funções de Avaliação do Desempenho dos edifícios em função do tipo de controlo da temperatura interior (sem e com climatização).

No quadro 4.24 é apresentada uma síntese dos códigos utilizados para identificar as Funções de Avaliação do Desempenho.

Quadro 4.24. – Códigos utilizados nas funções de avaliação do desempenho

Código	Identificação
Ctis	Controlo da Temperatura Interior: Sem climatização
Ctic	Controlo da Temperatura Interior: Com climatização
GHD	Graus-hora de desconforto
NHD	Número de horas com desconforto
N	Necessidade nominal de energia útil
q	Carga Térmica
S	Área do espaço
c	Valor calculado
i	Estação de aquecimento
v	Estação de arrefecimento
$T_a$	Temperatura do ar interior
$T_{mr}$	Temperatura média radiante
$T_s$	Temperatura superficial interior no centro do vidro

O valor das funções é dependente das variáveis consideradas e o seu cálculo requer o recurso a uma simulação anual do desempenho dos edifícios.

As funções de avaliação do desempenho serão calculadas de forma automática, através de uma aplicação desenvolvida em ambiente Excel, que calcula as funções a partir dos ficheiros de resultados \*.eso do programa *EnergyPlus* [10].

Para caraterizar as condições de conforto térmico no interior dos espaços em estudo e devido à existência do vão envidraçado, tendo em consideração os parâmetros simulados (temperatura do ar interior, temperatura média radiante, temperatura superficial interior no centro do vidro) foram definidas as seguintes funções de forma a avaliar o desempenho térmico dos espaços:

$$f(t, y) = \begin{cases} 18 - y(t) & \text{se } y(t) < 18^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } y(t) \geq 18^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.12.)$$

$$g(t, y) = \begin{cases} y(t) - 25 & \text{se } y(t) > 25^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } y(t) \leq 25^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.13.)$$

$$h(t, y, T_s, k) = \begin{cases} |y(t) - T_s(t)| & \text{se } |y(t) - T_s(t)| \geq k^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } |y(t) - T_s(t)| < k^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.14.)$$

$$q_i(t, y) = \begin{cases} q_i(t) & \text{se } y(t) \geq 18^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } y(t) < 18^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.15.)$$

$$q_v(t, y) = \begin{cases} q_v(t) & \text{se } y(t) \leq 25^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } y(t) > 25^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.16.)$$

onde  $y(t) = T_a(t)$  ou  $y(t) = T_{mr}$  e  $k \in \{5, 10\}$ .

#### 4.4.4.2. Controlo da Temperatura Interior: Sem Climatização (Ctis)

Foi considerada, primeiramente, a situação sem climatização, isto é, uma situação em que a temperatura do ar interior flutua livremente sem nenhum tipo de sistema de climatização (aquecimento ou arrefecimento), permitindo desta forma, obter as temperaturas interiores atingidas para cada combinação, permitindo avaliar, com mais facilidade, a contribuição de cada variável em estudo nas condições de conforto interior e, principalmente a contribuição dos vãos envidraçados. A preocupação com o conforto térmico, por um lado está relacionada com o problema das temperaturas baixas ou muito altas, sobreaquecimento, nos espaços durante os dias mais frios ou mais quentes e por outro lado devido à existência do vão envidraçado, ora a superfície do vão envidraçado pode estar mais fria ou mais quente (desconforto localizado).

Os parâmetros relacionados com o conforto térmico no interior dos espaços a simular, sem climatização:

Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta<18)</sup> - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura do ar interior (°C.h), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura do ar interior é inferior a 18 °C;

$Ctis\_GHD_i^{(T_{mr}<18)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura média radiante ( $^{\circ}C.h$ ), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é inferior a  $18^{\circ}C$ ;

$Ctis\_GHD_i^{(T_a>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura do ar interior ( $^{\circ}C.h$ ), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura do ar interior é superior a  $25^{\circ}C$ ;

$Ctis\_GHD_i^{(T_{mr}>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura média radiante ( $^{\circ}C.h$ ), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é superior a  $25^{\circ}C$ ;

$Ctis\_GHD_v^{(T_a>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de arrefecimento devido à temperatura do ar interior ( $^{\circ}C.h$ ), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura do ar interior é superior a  $25^{\circ}C$ ;

$Ctis\_GHD_v^{(T_{mr}>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de arrefecimento devido à temperatura média radiante ( $^{\circ}C.h$ ), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é superior a  $25^{\circ}C$ ;

podem ser matematicamente formulados, de um modo geral, do seguinte modo:

$$Ctis\_GHD_i^{(y<18)} = \sum_{t \in i} f(t, y) \quad (4.17.)$$

$$Ctis\_GHD_{iv}^{(y>25)} = \sum_{t \in iv} g(t, y) \quad (4.18.)$$

onde  $y \in \{T_a, T_{mr}\}$  e  $iv \in \{i, v\}$ .

Os parâmetros relacionados com o conforto térmico local devido à existência do vão envidraçado, que se aplicam-se à estação de aquecimento ( $i$ ) e à estação de arrefecimento ( $v$ ), sem climatização:

$Ctis\_NHD^{(|T_a-T_s|>10)}$  - Número de horas com desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro ( $h$ ), pode ser definida como o somatório do número de horas em que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro é superior a  $10^{\circ}C$ ;

$Ctis\_NHD^{(|T_a-T_s|>5)}$  - Número de horas com desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro ( $h$ ), pode ser definida como o somatório do número de horas em que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro é superior a  $5^{\circ}C$ .

podem ser matematicamente formulados, de um modo geral, do seguinte modo:

$$Ctis\_NHD_{iv}^{(|T_a-T_s|>k)} = \sum_{t \in iv} h(t, T_a, T_s, k) \quad (4.19.)$$

onde  $iv \in \{i, v\}$  e  $k \in \{5, 10\}$ .

#### 4.4.4.3. Controlo da Temperatura Interior: Com Climatização (Ctic)

Durante a estação de aquecimento, o sistema está ativo quando a temperatura do ar interior for inferior a 18 °C, acima deste valor a temperatura do ar interior flutua livremente. Durante a estação de arrefecimento, o sistema está ativo quando a temperatura do ar interior for superior a 25 °C, abaixo deste valor a temperatura do ar interior flutua livremente.

Os parâmetros relacionados com o conforto térmico no interior dos espaços a simular, com climatização:

$Ctic\_GHD_i^{(T_{mr}<18)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura média radiante (°C.h), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é inferior a 18 °C;

$Ctic\_GHD_i^{(T_a>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura do ar interior (°C.h), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura do ar interior é superior a 25 °C;

$Ctic\_GHD_i^{(T_{mr}>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de aquecimento devido à temperatura média radiante (°C.h), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é superior a 25 °C;

$Ctic\_GHD_v^{(T_{mr}>25)}$  - Graus-hora de desconforto na estação de arrefecimento devido à temperatura média radiante (°C.h), pode ser definida como o somatório, com base horária, do número de graus em que a temperatura média radiante é superior a 25 °C;

$Ctic\_N_{ic}^{(T_a\geq 18)}$  - Necessidade nominal de energia útil para aquecimento (kWh/ano.m<sup>2</sup>), pode ser definida como o somatório da carga térmica, numa base horária, necessária para que a temperatura do ar interior seja superior ou igual a 18 °C durante a estação de aquecimento em relação à área do espaço (S);

$Ctic\_N_{vc}^{(T_a\leq 25)}$  - Necessidade nominal de energia útil para arrefecimento (kWh/ano.m<sup>2</sup>), pode ser definida como o somatório da carga térmica, numa base horária, necessária para que a temperatura do ar interior seja inferior ou igual a 25 °C durante a estação de arrefecimento em relação à área do espaço (S).

podem ser matematicamente formulados, de um modo geral, do seguinte modo:

$$Ctic\_GHD_i^{(y<18)} = \sum_{t \in i} f(t, y) \quad (4.20.)$$

$$Ctic\_GHD_{iv}^{(y>25)} = \sum_{t \in iv} g(t, y) \quad (4.21.)$$

$$Ctic\_N_{ic}^{(y\geq 18)} = \frac{\sum_{t \in i} q_i(t, y)}{S} \quad (4.22.)$$

$$Ctic\_N_{vc}^{(y\leq 25)} = \frac{\sum_{t \in v} q_v(t, y)}{S} \quad (4.23.)$$

onde  $y \in \{T_a, T_{mr}\}$ ,  $iv \in \{i, v\}$ .

Para permitir a comparação dos resultados obtidos para a necessidade nominal de energia útil entre os espaços com diferentes profundidades, os somatórios da carga térmica foram divididos pela área de pavimento de cada espaço.

Os parâmetros relacionados com o conforto térmico local devido à existência do vão envidraçado, que se aplicam-se à estação de aquecimento (*i*) e à estação de arrefecimento (*v*), com climatização:

$Ctic\_NHD^{(|Ta-Ts|>10)}$  - Número de horas com desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro (*h*), pode ser definida como o somatório do número de horas em que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro é superior a 10 °C;

$Ctic\_NHD^{(|Ta-Ts|>5)}$  - Número de horas com desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro (*h*), pode ser definida como o somatório do número de horas em que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro é superior a 5 °C.

podem ser matematicamente formulados, de um modo geral, do seguinte modo:

$$Ctic\_NHD_{iv}^{(|y-x|>k)} = \sum_{t \in iv} h(t, y, x) \quad (4.24.)$$

onde  $iv \in \{i, v\}$  e  $k \in \{5, 10\}$ .

## 4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.5.1. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS

A seleção de soluções construtivas, relativamente aos vãos envidraçados, que garantam um desempenho otimizado, no que se refere quer às necessidades de conforto térmico interior e quer ao conforto na proximidade dos mesmos, para a estação de aquecimento e de arrefecimento, corresponde a um problema de otimização multiobjetivo, pois trata-se de objetivos conflituosos entre si. Foi criado um modelo matemático que permite obter o valor mínimo das funções de avaliação do desempenho relacionadas com a temperatura do ar ( $Ctis\_GHD$ ) e com a necessidade de energia útil ( $Ctic\_N_{ic}$ ,  $Ctic\_N_{vc}$ ), e para apresentar e analisar os resultados de todas as funções de avaliação do desempenho definidas será utilizada uma ferramenta de *Business Intelligence* (BI). Essa ferramenta também foi utilizada para criar e apresentar o modelo simplificado de seleção. No capítulo 5 desta Tese será apresentada uma análise paramétrica dos resultados obtidos para todas as variáveis em estudo, com a seleção das opções das variáveis relacionadas com as características dos vãos envidraçados, através de apresentação gráfica e numérica.

Devido ao grande número de variáveis em análise (15), inumeradas no quadro 4.25, o que, em função do número de opções escolhidas corresponde a 2 239 488 combinações e à necessidade de criar 18 modelos do edifício, em que os espaços têm profundidade e vãos envidraçados com área diferente, no programa *DesignBuilder*, foi necessário organizar a maneira como iriam ser feitas as simulações e armazenar os resultados das mesmas. Foi criada uma estrutura hierárquica dividida em três níveis: para o primeiro nível foi criado um ficheiro com 192 combinações, com a identificação apresentada no



quadro 4.26 (Norte de 1 a 48, Este de 49 a 96, Sul de 97 a 144 e Oeste de 145 a 192), com opções relativas à orientação do vão envidraçado, à espessura do isolamento térmico, à cor da fachada, ao tipo de ventilação, às características do vidro, ao tipo de caixilho, para cada um dos espaços (A.0, A.1, A.2, B.0, B.1 e B.2); no segundo nível foram criados 10 368 ficheiros, com informações relativas ao tipo de sombreamento por elementos exteriores, ao tipo de vidro, ao tipo de proteção solar e à localização geográfica do edifício (SE\_V\_Ps\_Localização geográfica) e por fim estes ficheiros foram organizados em 36 pastas, com informações relativas ao controlo da temperatura interior, à profundidade, à relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento e à inércia térmica (Cti\_Prof\_Ae\_It), totalizando 373 248 ficheiros.

Os resultados das funções de avaliação do desempenho, ValoresFinais, foram agrupados em 648 ficheiros tendo em consideração os dois níveis mais elevados da hierarquia (Cti\_Prof\_Ae\_It\_SE\_V\_Ps), posteriormente foram agrupados em 18 ficheiros tendo apenas em consideração a profundidade, a relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento e à inércia térmica (Prof\_Ae\_It) e finalmente foi criada uma base de dados com extensão “csv” com 1 119 744 linhas de dados. Todos estes resultados, ValoresFinais, são fornecidos no DVD anexo a esta Tese.

Quadro 4.25. – Estrutura Geral do Estudo

Nível	Variável (Caraterística)		Opções			
	Designação		N.º	Designação		
3	1	Controlo da Temperatura Interior (Cti)	2	Sem climatização (Ctis)	Com climatização (Ctic)	
3	2	Profundidade (Prof)	3	6 m x 3 m (Prof1)	6 m x 6 m (Prof2)	6 m x 9 m (Prof3)
3	3	Relação $A_{env}/A_p$ (Ae)	3	10% (Ae10)	15% (Ae15)	30% (Ae30)
3	4	Inércia Térmica ( $I_t$ )	2	Forte (F)	Frac (f)	
2	5	Sombreamento (SE)	3	Horizontal (SEh)	Vertical (SEv)	Inexistente (SEs)
2	6	Proteção Solar (Ps)	3	Exterior (Pse)	Interior (Psi)	Inexistente (sPs)
2	7	Tipo de Vidro (V)	2	Duplo (Vd)	Simples (Vs)	
2	8	Localização Geográfica	3	Bragança (Bra)	Porto (Por)	Évora (Evo)
1	9	Orientação do Vão	4	Norte (N)	Este (E)	Sul (S) Oeste (O)
1	10	Espessura do Isolamento (EI)	2	EI_3/6 cm <sup>(1)</sup>		EI_6/12 cm <sup>(1)</sup>
1	11	Cor da Fachada	2	Clara (C)		Escura (E)
1	12	Tipo de Ventilação (Ra)	2	Ra1 [0,6 / 0,0 h <sup>-1</sup> ] <sup>(1)</sup>		Ra2 [0,6 / 2,0 h <sup>-1</sup> ] <sup>(1)</sup>
1	13	Caraterísticas do Vidro	3	Incolor	Verde	LoE
1	14	Caixilharia	2	Al sem Corte Térmico		Al com Corte Térmico
1	15	Espaço	6	A.0	A.1	A.2 B.0 B.1 B.2

(1) Espessura do isolamento térmico ( $EI_{parede}/EI_{cobertura}$ ).

(2) Ventilação mínima (permanente) / ventilação noturna durante a estação de arrefecimento.

No entanto, face ao elevado número de variáveis que estão a ser avaliadas, facto que conduz a uma elevada complexidade de todo o procedimento matemático e computacional, optou-se por realizar uma análise paramétrica de sensibilidade das variáveis em estudo.

Procurou-se avaliar o impacto individual da alteração de cada uma das variáveis no desempenho do edifício tendo em consideração as funções de avaliação do desempenho definidas para o efeito, em primeiro ilustrando a sensibilidade do comportamento dos edifícios em função das 192 combinações correspondentes ao Nível 3 e um segundo grupo ilustrando o desempenho dos edifícios para as variáveis correspondentes ao Nível 1 e 2 (Cti\_Prof\_Ae\_It\_Gih\_SE\_V\_Ps\_Localização geográfica).

Quadro 4.26. – Identificação das Combinações de 1 a 192

Orientação / Combinação				Isolamento Térmico	Cor Fachada	Ventilação	Caraterísticas Vidro	Tipo Caixilho
N	E	S	W					
1	49	97	145	I_3/6 cm	C	Ra1	Incolor	Al sem Corte
2	50	98	146					Al com Corte
3	51	99	147				Verde	Al sem Corte
4	52	100	148					Al com Corte
5	53	101	149				LoE	Al sem Corte
6	54	102	150					Al com Corte
7	55	103	151			Ra2	Incolor	Al sem Corte
8	56	104	152					Al com Corte
9	57	105	153				Verde	Al sem Corte
10	58	106	154					Al com Corte
11	59	107	155				LoE	Al sem Corte
12	60	108	156					Al com Corte
13	61	109	157		E	Ra1	Incolor	Al sem Corte
14	62	110	158					Al com Corte
15	63	111	159				Verde	Al sem Corte
16	64	112	160					Al com Corte
17	65	113	161				LoE	Al sem Corte
18	66	114	162					Al com Corte
19	67	115	163			Ra2	Incolor	Al sem Corte
20	68	116	164					Al com Corte
21	69	117	165				Verde	Al sem Corte
22	70	118	166					Al com Corte
23	71	119	167				LoE	Al sem Corte
24	72	120	168					Al com Corte
25	73	121	169	I_6/12 cm	C	Ra1	Incolor	Al sem Corte
26	74	122	170					Al com Corte
27	75	123	171				Verde	Al sem Corte
28	76	124	172					Al com Corte
29	77	125	173				LoE	Al sem Corte
30	78	126	174					Al com Corte
31	79	127	175			Ra2	Incolor	Al sem Corte
32	80	128	176					Al com Corte
33	81	129	177				Verde	Al sem Corte
34	82	130	178					Al com Corte
35	83	131	179				LoE	Al sem Corte
36	84	132	180					Al com Corte
37	85	133	181		E	Ra1	Incolor	Al sem Corte
38	86	134	182					Al com Corte
39	87	135	183				Verde	Al sem Corte
40	88	136	184					Al com Corte
41	89	137	185				LoE	Al sem Corte
42	90	138	186					Al com Corte
43	91	139	187			Ra2	Incolor	Al sem Corte
44	92	140	188					Al com Corte
45	93	141	189				Verde	Al sem Corte
46	94	142	190					Al com Corte
47	95	143	191				LoE	Al sem Corte
48	96	144	192					Al com Corte

Através da análise efetuada para o segundo grupo de variáveis foi possível verificar qual o peso relativo de cada variável no desempenho dos edifícios, no que se refere às condições de conforto durante a estação de aquecimento e da estação de arrefecimento, permitindo, deste modo, retirar algumas conclusões sobre as variáveis em que se deve focar mais atenção aquando da otimização das soluções construtivas.

No ponto seguinte serão apresentados e analisados alguns dos resultados obtidos nas simulações e alguns resultados obtidos após a aplicação das funções de avaliação do desempenho anteriormente definidas.

Os objetivos desta análise são:

- Apresentar a evolução das condições no interior dos Espaços (temperatura do ar, temperatura média radiante e temperatura superficial no centro do vidro) para a estação de aquecimento e para a estação de arrefecimento e para a meia estação (outono);
- Apresentar a sensibilidade dos espaços em relação à aplicação das funções de avaliação do desempenho para a estação de aquecimento e para estação de arrefecimento;
- Verificar se há coerência nos resultados obtidos, em relação às duas estações do ano analisadas;
- Verificar o funcionamento correto do programa e de todo o procedimento automático utilizado em relação às diferentes variáveis consideradas nas simulações.

#### 4.5.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste ponto são analisados alguns resultados das simulações, relativas à variação da temperatura média diária do ar ( $T_a$ ) no interior do espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada) ao longo do ano, considerando o tipo de controlo da temperatura interior ( $C_{ti}$ ), para aferir da sensibilidade dos espaços relativamente aos elementos que constituem os vãos envidraçados em relação às seguintes variáveis, nomeadamente:

- Orientação;
- Área do vão envidraçado;
- Inércia Térmica;
- Espaço que servem.

Apresenta-se também uma análise das condições no interior dos espaços comparando-se a temperatura do ar ( $T_a$ ) com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e com temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ) para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul.

O caso em análise corresponde ao modelo de um edifício, localizado em Bragança, em que o espaço a simular tem o seguinte cenário: 6,00 m de fachada; 3,00 m de profundidade (Prof1); fachada (envolvente exterior) com 3,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{parede\_3}$  cm) e cobertura com 6,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{cobertura\_6}$  cm), ambos com revestimento exterior claro; para a ventilação considerou-se a opção (Ra1 –  $[0,6 \text{ h}^{-1}/0,0 \text{ h}^{-1}]$ ); sombreamento por elementos horizontais exteriores (SEh); dispositivos de proteção solar pelo exterior (PSe); caixilho em alumínio sem corte térmico (Al sem corte térmico) e vidro duplo (Vd) incolor (incolor). Para a situação com inércia forte e fraca.

Os resultados das simulações em análise são apresentados no Anexo C. Como foi referido anteriormente foram obtidos 373 248 ficheiros com resultados das simulações para todos os espaços em análise, não sendo possível apresentar todos os resultados.

Assim, ao observar os resultados obtidos é possível tirar as seguintes conclusões:

1) Controlo da temperatura interior: Sem climatização (Ctis):

- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento (outubro a maio) que a temperatura média diária do ar interior é muito baixa, variando de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados, na maior parte do tempo entre os 6 e os 11 °C, sendo ligeiramente superior nos vãos orientados a Sul e com 30% de área do vão envidraçado na maior parte do tempo entre os 7 e os 13 °C, mas no fim de outubro e início de novembro apresenta alguns valores superiores a 18 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média diária do ar interior é também muito baixa, variando de um modo geral e de uma forma menos uniforme, apresentando valores mais elevados para os vãos com 30% de área envidraçada, para todas as orientações, na maior parte do tempo entre os 6 e os 14 °C, no início de maio para os vãos com 30% de área do vão envidraçado e orientados Este e Oeste apresenta alguns valores superiores a 22 °C, os vãos orientados a sul e com 30% de área do vão envidraçado apresentam valores, na maior parte do tempo entre os 15 e os 18 °C, no fim de outubro e início de novembro chega a apresentar alguns valores superiores a 24 °C;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento (junho a setembro) que a temperatura média diária do ar varia de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 16 e os 24 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média diária do ar interior varia de um modo geral e de uma forma menos uniforme, apresentando valores mais elevados para os vãos com 30% de área do vão envidraçado, para todas as orientações, na maior parte do tempo entre os 20 e os 28 °C, com exceção dos vãos orientados a Este e a Oeste com 30% de área do vão envidraçado apresentam valores, na maior parte do tempo entre os 22 e os 30 °C, no fim de julho chega a apresentar alguns valores superiores a 30 °C;
- Em relação à inércia térmica, ao longo do ano, é possível verificar que quando esta é forte durante a estação de aquecimento a variação da temperatura média diária do ar interior é ligeiramente inferior, em ambos os espaços, sendo menor no espaço A.0, durante a estação de arrefecimento a variação da temperatura média diária do ar interior também é ligeiramente inferior, em ambos os espaços, sendo também menor no espaço A.0;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 16 e 17 de janeiro que a temperatura média horária do ar interior é muito baixa, variando de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 7 e os 9 °C, sendo ligeiramente superior nos vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado variando entre os 9 e os 13 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média horária do ar interior é também muito baixa, variando de um modo geral e de uma forma menos uniforme, apresentando valores mais elevados para os vãos orientados a sul, varia entre os 9 e os 12 °C, com exceção dos vãos orientados a sul com 30% de área do vão envidraçado apresentam valores entre os 13 e os 17 °C;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 01 e 02 de novembro que a temperatura média horária do ar interior é mais elevada que nos dias de janeiro, variando de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 15 e os 17 °C, sendo ligeiramente superior nos vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado variando

entre os 16 e os 20 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média horária do ar interior é também é mais elevada que nos dias de janeiro, variando de um modo geral e de uma forma menos uniforme, apresentado valores mais elevados para os vãos orientados a Oeste, entre os 16 e os 21 °C, com exceção dos vãos orientados a sul com 30% de área do vão envidraçado apresentam valores entre os 21 e os 26 °C;

- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento para os dias 01 e 02 de agosto, que a temperatura média horária do ar interior varia de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 19 e os 22 °C, sendo ligeiramente superior nos vãos orientados a Este e Oeste com 30% de área do vão envidraçado variando entre os 20 e os 23 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média horária do ar interior varia de um modo geral e de uma forma menos uniforme, apresentado valores mais elevados para os vãos orientados a Este e a Oeste em função da área do vão envidraçado, entre os 23 e os 29 °C;
- Em relação à inércia térmica, é possível verificar que quando esta é fraca durante a estação de aquecimento a variação da temperatura média diária do ar interior é ligeiramente superior, em ambos os espaços, sendo maior para os vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado, durante a estação de arrefecimento a variação da temperatura média diária do ar interior também é superior, em ambos os espaços, no espaço B.1 a temperatura média diária do ar interior é superior a 32 °C para os vãos orientados a Oeste com 30% de área do vão envidraçado;
- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 16 e 17 de janeiro, é possível verificar que quando os vãos estão orientados a Norte os valores horários de  $T_a$  e  $T_{mr}$  são muito semelhantes e mais ou menos uniformes cerca de 8 °C e que os valores obtidos para a  $T_s$  são inferiores oscilando entre os 4,5 e os 7,5 °C. Quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, entre às 10:00 e as 16:00 os valores da  $T_s$ , são superiores aos da  $T_a$  e da  $T_{mr}$ , oscilando, respetivamente, entre os 10 e os 15 °C e os 9 e os 13 °C, apresentado a  $T_{mr}$  valores ligeiramente superiores aos da  $T_a$ , a diferença maior verifica-se para a área do vão envidraçado maior. No espaço B.1, a Norte o cenário é muito semelhante mas para temperaturas horárias mais elevadas, a Sul verifica-se uma diferença muito superior em relação à  $T_s$  para a área do vão envidraçado menor;
- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 01 e 02 de novembro, é possível verificar que quando os vãos estão orientados a Norte os valores horários de  $T_a$  e  $T_{mr}$  são muito semelhantes e mais ou menos uniformes entre os 14 e os 16 °C e que os valores obtidos para a  $T_s$  são inferiores durante a noite e um pouco superiores durante o dia oscilando entre os 11 e os 17 °C. Quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, entre às 10:00 e as 17:00 os valores da  $T_s$ , são superiores aos da  $T_a$  e da  $T_{mr}$ , oscilando, respetivamente, entre os 19 e os 24,5 °C e os 18 e os 20,5 °C, neste período os valores da  $T_{mr}$  e da  $T_a$  são muito semelhantes. No espaço B.1, a Norte o cenário é muito semelhante mas para temperaturas horárias mais elevadas, a Sul verifica-se uma diferença muito superior em relação à  $T_s$  para a área do vão envidraçado menor;
- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento para os dias 01 e 02 de agosto, é possível verificar os valores obtidos

para as duas orientações são muito semelhantes, devido à existência de elementos horizontais exteriores (SEh) e de dispositivos de proteção solar pelo exterior (PSe) nas duas orientações, durante o dia os valores horários da  $T_{mr}$  são inferiores aos da  $T_a$  e os valores obtidos para a  $T_s$  são inferiores durante a noite e muito superiores durante o dia. No espaço B.1, o cenário é muito semelhante mas para temperaturas horárias mais elevadas, verifica-se uma diferença inferior em relação à  $T_s$ ;

- Em relação à inércia térmica, é possível verificar que quando esta é fraca durante a estação de aquecimento a variação da  $T_a$  e da  $T_{mr}$  é muito superior, chegando a ser superior à  $T_s$  durante o dia, em ambos os espaços, sendo o maior no espaço B.1 e para os vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado, durante a estação de arrefecimento o cenário é muito semelhante, em relação à situação com inércia forte, mas para temperaturas horárias mais elevadas.

2) Controlo da temperatura interior: Com climatização (Ctic), o sistema de aquecimento e arrefecimento a funcionar 24 horas durante toda a respetiva estação, de forma a garantir uma temperatura do ar interior mínima de 18 °C durante a estação de aquecimento e uma temperatura do ar interior máxima de 25 °C durante a estação de arrefecimento:

- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento (outubro a maio) que a temperatura média diária do ar interior é de 18 °C, obtida através do aquecimento do espaço, mas no fim de outubro e início de novembro apresenta alguns valores superiores a 18 °C. Para o mesmo período no espaço B.1 a temperatura média diária do ar interior é de 18 °C, obtida através do aquecimento do espaço, apresentando alguns valores superiores a 18 °C para os vãos com 30% de área envidraçada, principalmente para os vãos envidraçados a Sul, no fim de outubro e início de novembro chega a apresentar alguns valores superiores a 24 °C;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento (junho a setembro) que a temperatura média diária do ar varia de um modo geral e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 16 e os 24 °C, não necessitando do sistema de arrefecimento. Para o mesmo período no espaço B.1 foi necessário ativar o sistema de arrefecimento;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 16 e 17 de janeiro que a temperatura do ar é de 18 °C, obtida através do aquecimento do espaço. Para o mesmo período no espaço B.1 apresentando valores superiores a 18 °C para os vãos com 30% de área do vão envidraçado, para os vãos envidraçados a Sul durante as horas do dia;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 01 e 02 de novembro que a temperatura do ar é 18 °C, obtida através do aquecimento do espaço, apresentando valores superiores a 18 °C para os vãos com 30% de área do vão envidraçado, principalmente, para os vãos envidraçados a Sul durante as horas do dia. Para o mesmo período no espaço B.1 apresentando valores superiores a 18 °C para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados durante as horas do dia, chegando mesmo a apresentar valores superiores a 25 °C para os vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado;
- É possível verificar que em Bragança, o espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento para os dias 01 e 02 de agosto, que a temperatura do ar varia de um modo geral

e de uma forma uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 19 e os 23 °C, não necessitando do sistema de arrefecimento. Para o mesmo período no espaço B.1 foi necessário ativar o sistema de arrefecimento, a temperatura do ar varia de um modo geral e de uma forma pouco uniforme para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 23 e os 25 °C;

- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 16 e 17 de janeiro, é possível verificar que quando os vãos estão orientados a Norte os valores horários da  $T_{mr}$  são inferiores aos da  $T_a$  (18 °C) para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados registando cerca de 14,5 °C e que os valores obtidos para a  $T_s$  são ainda mais baixos oscilando entre os 11 e os 12,5 °C. Quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, entre às 12:00 e as 16:00 os valores da  $T_s$ , são ligeiramente superiores aos da  $T_a$  para os vãos com 30% de área do vão envidraçado e orientados a Sul. No espaço B.1, a Norte o cenário é muito semelhante mas para temperaturas horárias mais elevadas, a Sul observam-se muitos valores superiores a 18 °C para a  $T_a$ ,  $T_{mr}$  e  $T_s$  para os vãos orientados a Sul com 30% de área do vão envidraçado;
- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de aquecimento para os dias 01 e 02 de novembro, é possível verificar que quando os vãos estão orientados a Norte os valores horários da  $T_{mr}$  são inferiores aos da  $T_a$  (18 °C) para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados registando cerca de 17 °C e que os valores obtidos para a  $T_s$  oscilam entre os 13 e os 18 °C. Quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, entre às 10:00 e as 18:00 os valores da  $T_s$ , são superiores aos da  $T_a$  para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados entre os 19 e os 25 °C. No espaço B.1, a Norte o cenário é muito semelhante mas para temperaturas horárias mais elevadas, a Sul observam-se muitos valores superiores a 18 °C para a  $T_a$ ,  $T_{mr}$  e  $T_s$  para todas as orientações e áreas dos vãos envidraçados;
- Em relação à variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ) da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), no espaço A.0 com inércia térmica forte, durante a estação de arrefecimento para os dias 01 e 02 de agosto, o cenário é muito semelhante à situação sem climatização;
- Em relação à inércia térmica é possível verificar que quando esta é forte durante a estação de aquecimento a variação da temperatura do ar interior é menor, para valores acima dos 18 °C, em ambos os espaços, sendo quase nula no espaço A.0. Podemos observar que em ambos os espaços, na situação de inércia térmica é fraca, a temperatura do ar apresenta valores superiores a 25 °C. Durante a estação de arrefecimento, o espaço A.0 apresenta uma variação da temperatura do ar interior menor.

#### 4.5.3. RESULTADOS DAS FUNÇÕES DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho foram organizadas em 648 ficheiros, em cada um destes ficheiros foram inseridas 576 simulações (3 x 192 combinações para cada um dos espaços analisados para cada localização) num total de 3 456 combinações por ficheiro, tendo em consideração o controlo da temperatura interior (Cti), a profundidade do espaço (Prof), a relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), a inércia térmica ( $I_t$ ), o sombreamento por elementos exteriores (SE), o tipo de

ganhos internos (Gi), o tipo de vidro (V) e a proteção solar (Ps). Exemplo da identificação de um ficheiro (Macro\_VAL\_FINAIS\_Ctis\_Prof2\_Ae30\_Pesado\_SEv\_Gih\_Vs\_sPs). Todos estes resultados são fornecidos no DVD anexo a esta Tese.

Para cada função de avaliação de desempenho, os resultados obtidos foram representados num gráfico semelhante ao das figuras seguintes, por localização geográfica em análise, de forma a se poder averiguar se o programa de simulação estava a funcionar corretamente e todo o procedimento automático utilizado em relação às diferentes variáveis consideradas e para posteriormente serem inseridos na base de dados com extensão “csv” com 1 119 744 linhas de dados.

Nas figuras 4.50 a 4.55 é apresentada a sensibilidade em relação às funções relacionadas com a temperatura do ar interior ( $T_a$ ) dos espaços, Graus-hora de desconforto ( $Ctis\_GHD_i^{(T_a < 18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(T_a > 25)}$ ), para o conjunto de combinações designado por, Ctis\_Prof2\_Ae30\_Forte\_SEs\_Gih\_Vd\_sPs, em que: Ctis, controlo da temperatura interior - sem climatização; Prof2, corresponde à profundidade de 6,00 m; Ae30, corresponde à relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 30%; Forte, indica a inércia térmica; SEs, corresponde ao sombreamento por elementos exteriores; Gih, ganhos internos relativos a habitação; Vd, corresponde ao vidro duplo e sPs, indica o tipo de proteção solar, neste caso sem proteção. No quadro 4.26 é apresentada a identificação das combinações.

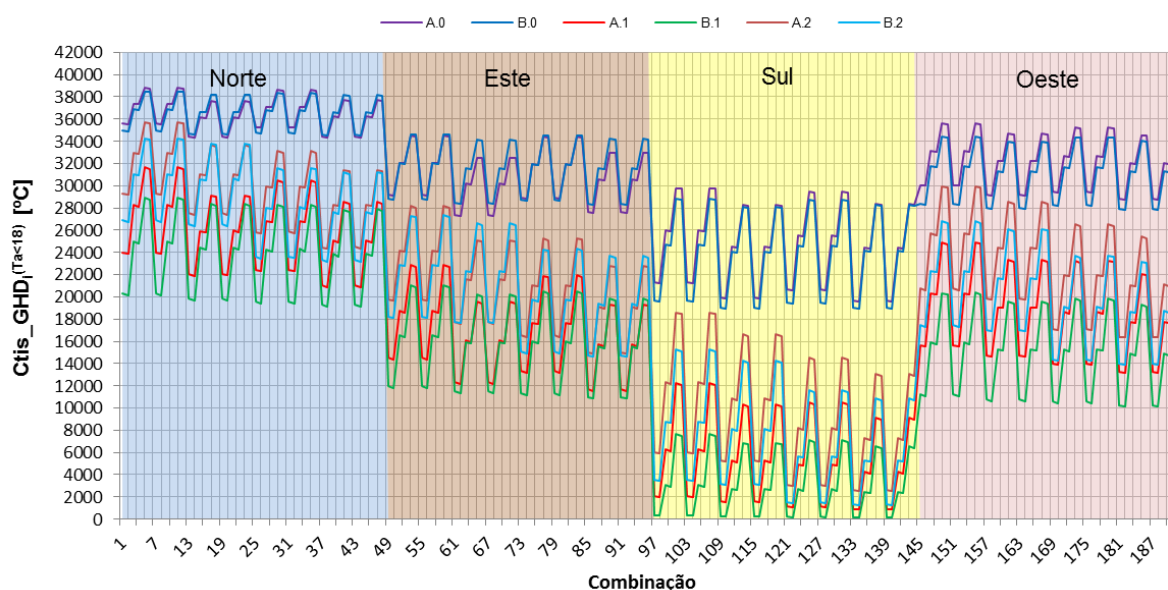
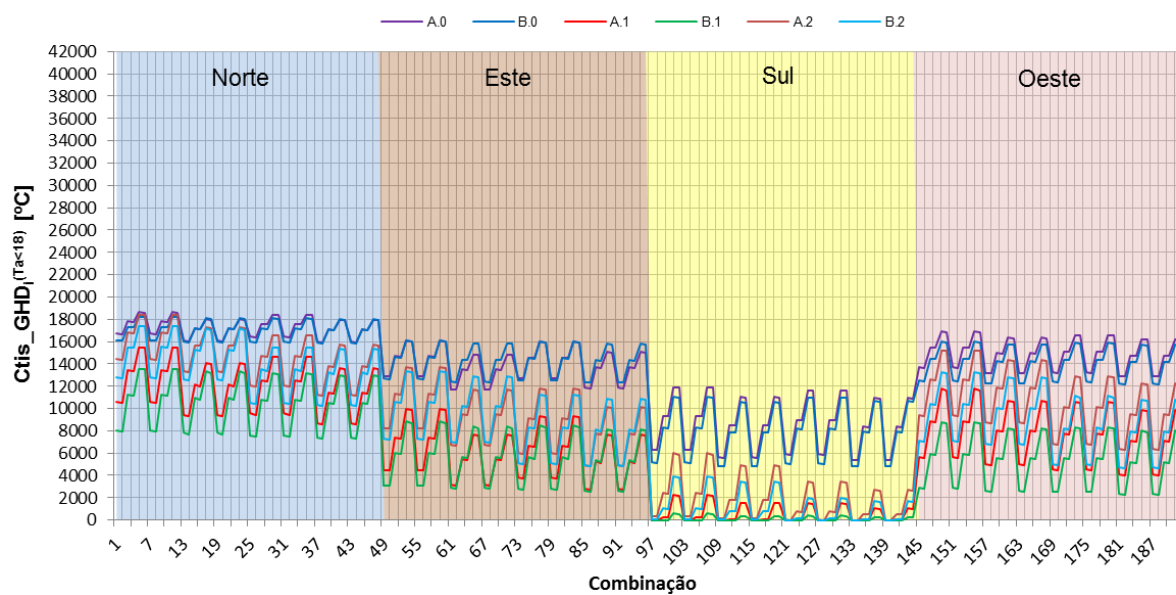
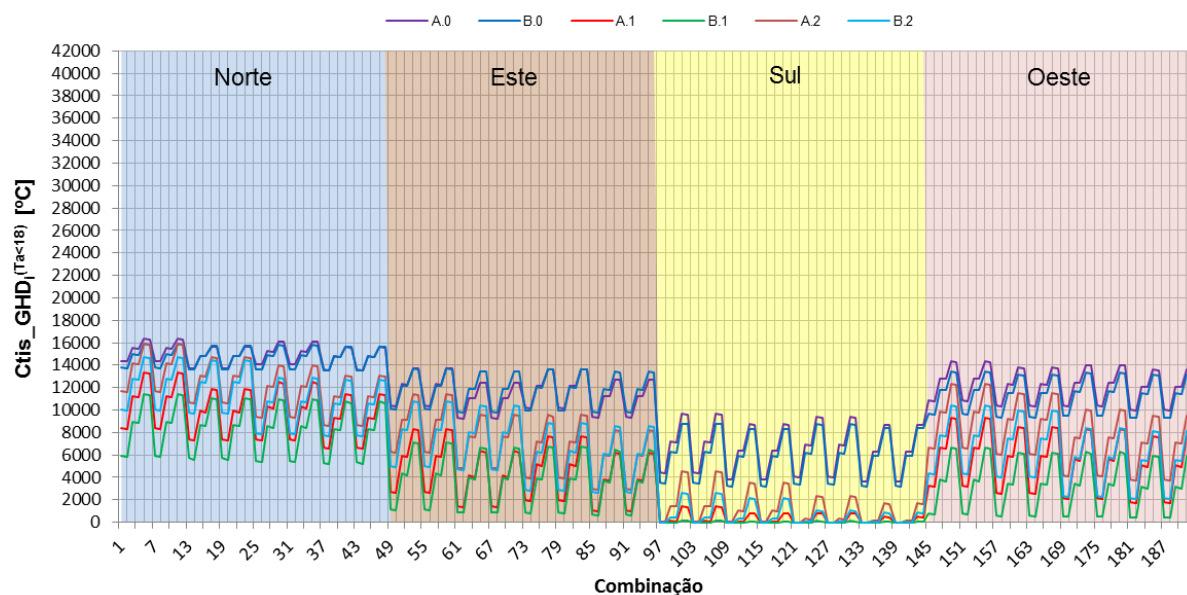


Fig.4.50. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(T_a < 18)}$  em Bragança





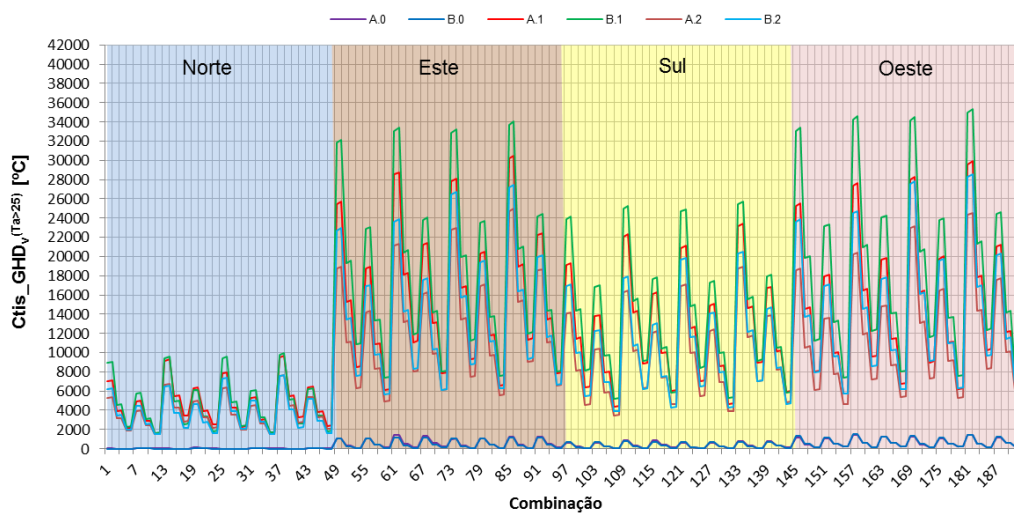


Fig.4.53. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $C_{tis\_GHD_v}(T_{a>25})$  em Bragança

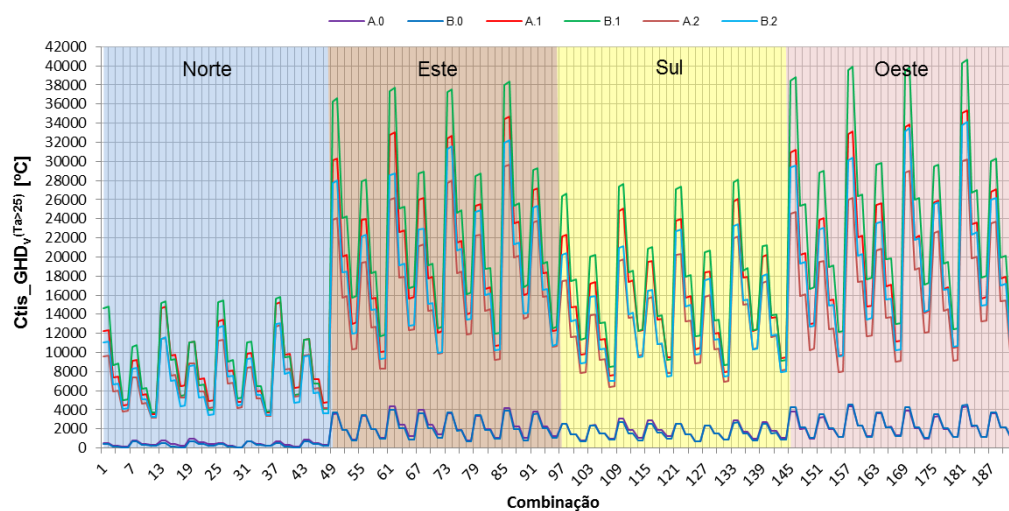


Fig.4.54. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $C_{tis\_GHD_v}(T_{a>25})$  em Évora

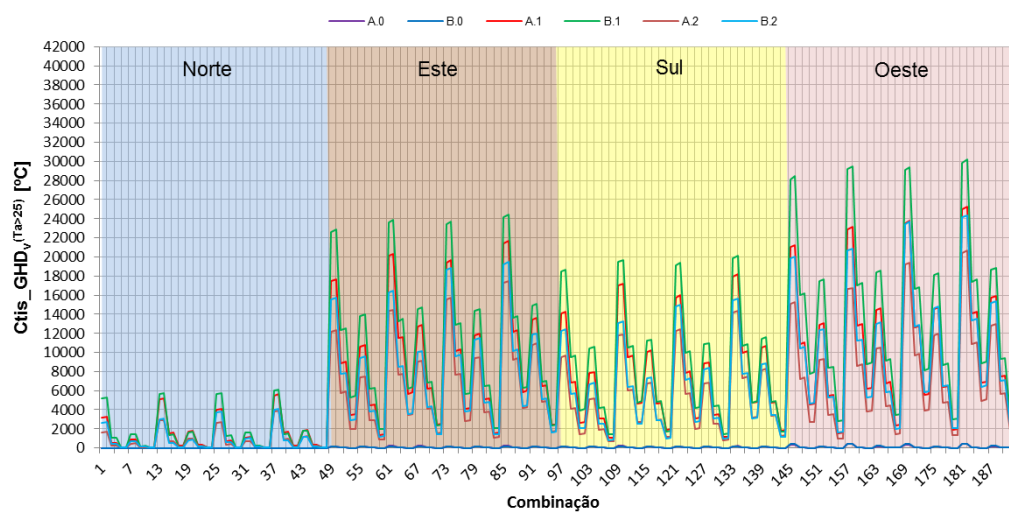


Fig.4.55. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $C_{tis\_GHD_v}(T_{a>25})$  no Porto

Nas figuras 4.56 a 4.61 é apresentada a sensibilidade em relação às funções relacionadas com a necessidade nominal de energia útil para aquecimento e arrefecimento dos espaços, respetivamente, ( $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  e  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$ ), para o conjunto de combinações designado por,  $Ctic\_Prof2\_Ae30\_Forte\_SEs\_Gih\_Vd\_sPs$ , em que: Ctic, controlo da temperatura interior - com climatização; Prof2, corresponde à profundidade de 6,00 m; Ae30, corresponde à relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 30%; Forte, indica a inércia térmica; SEs, corresponde ao sombreamento por elementos exteriores; Gih, ganhos internos relativos a habitação; Vd, corresponde ao vidro duplo e sPs, indica o tipo de proteção solar, neste caso sem proteção. No quadro 4.26 é apresentada a identificação das combinações.

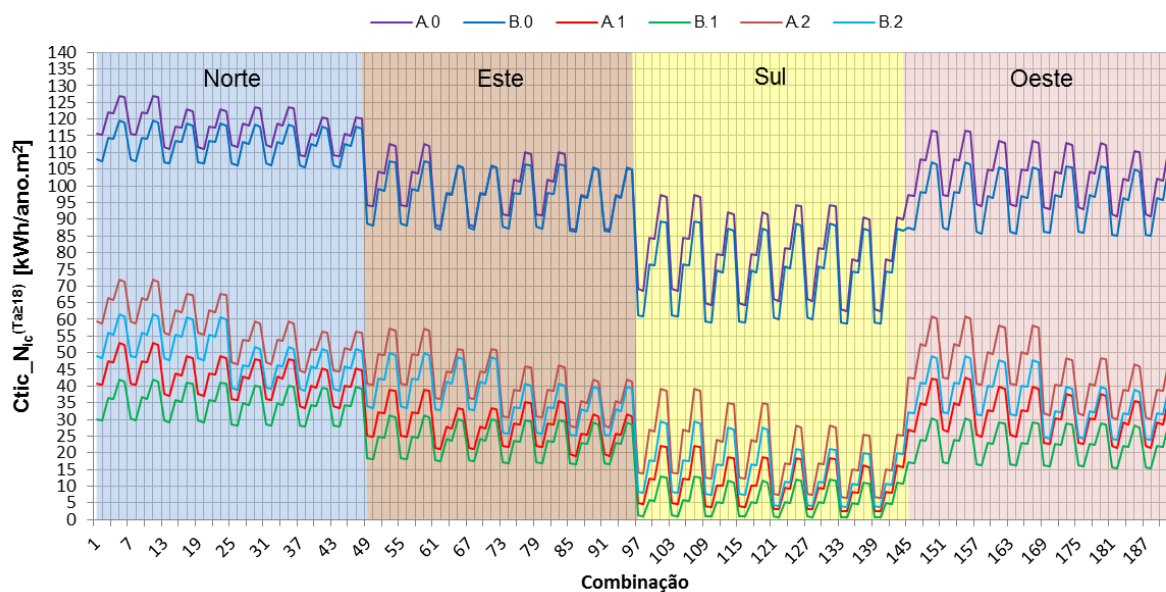


Fig.4.56. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  em Bragança

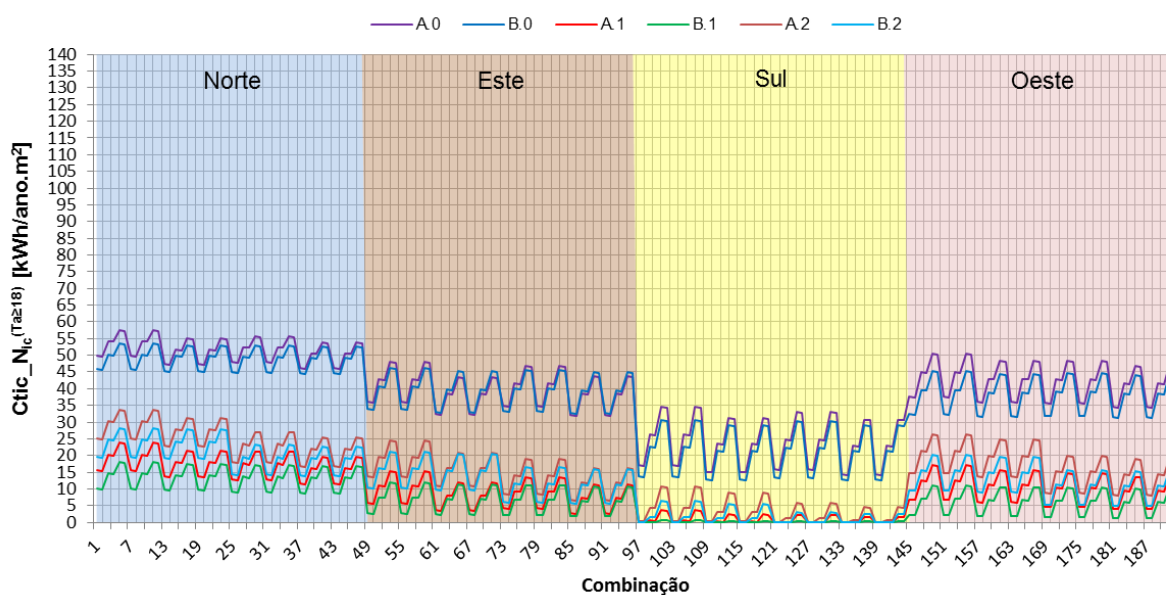


Fig.4.57. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  em Évora

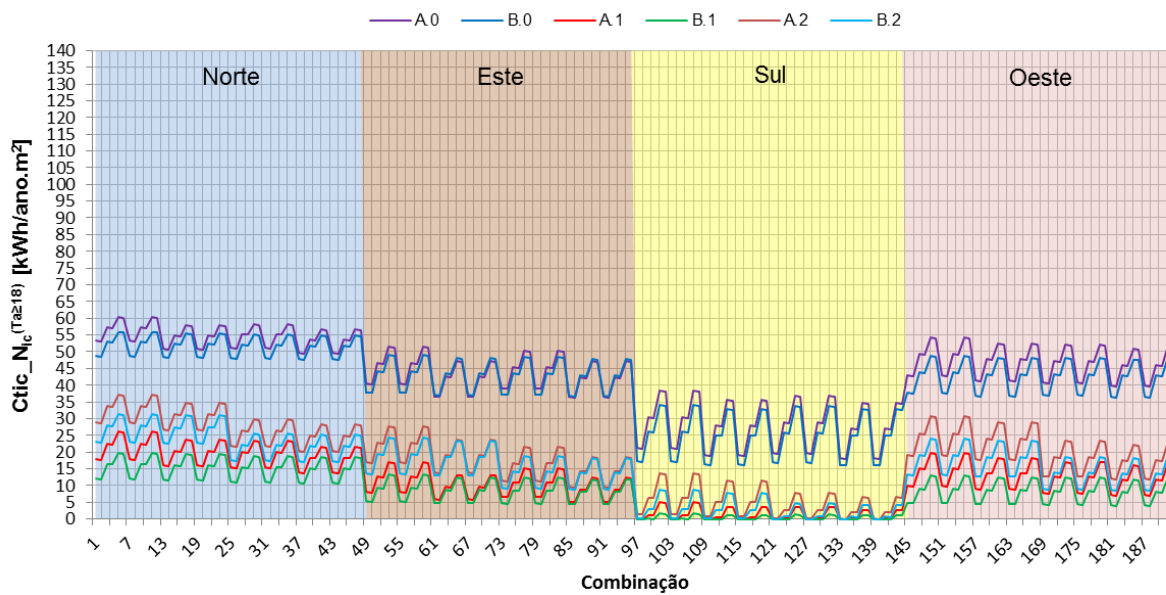


Fig.4.58. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  no Porto

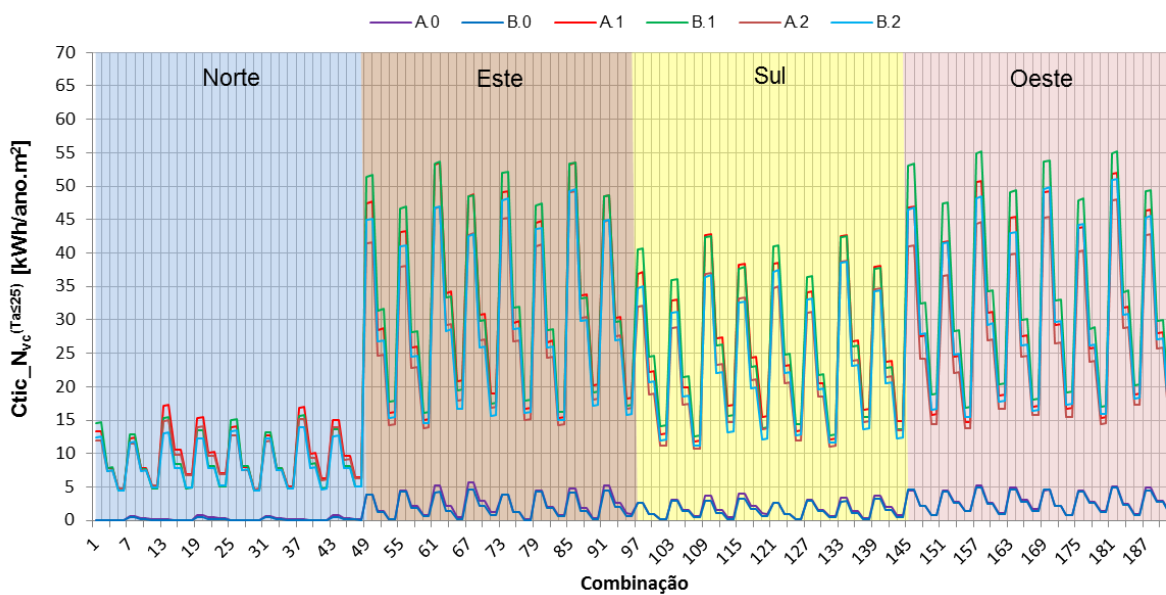


Fig.4.59. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$  em Bragança

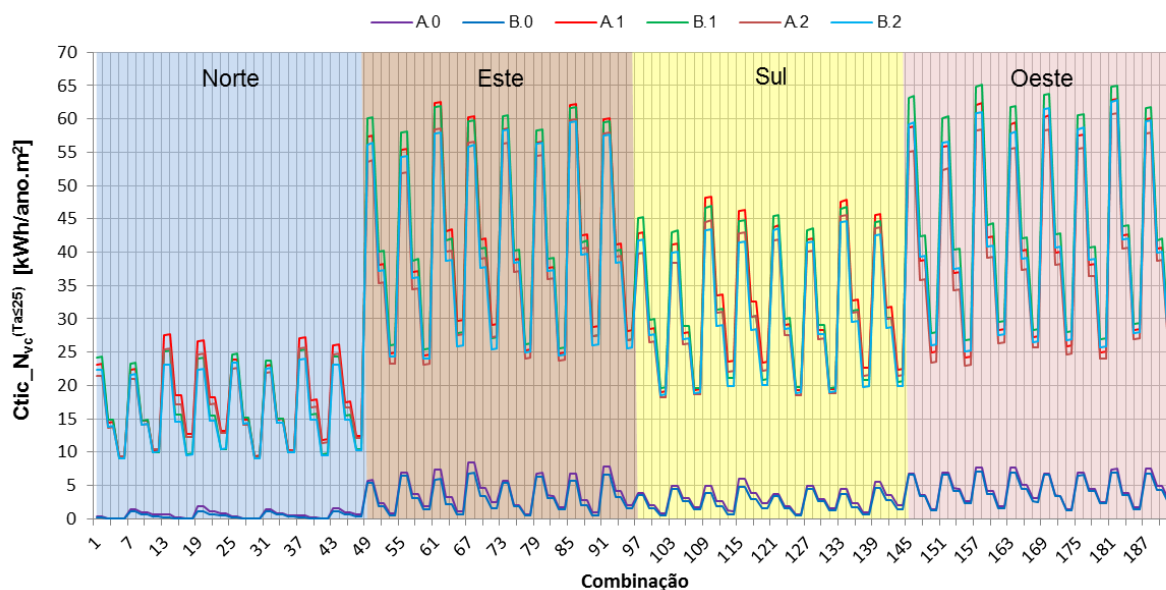


Fig.4.60. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$  em Évora

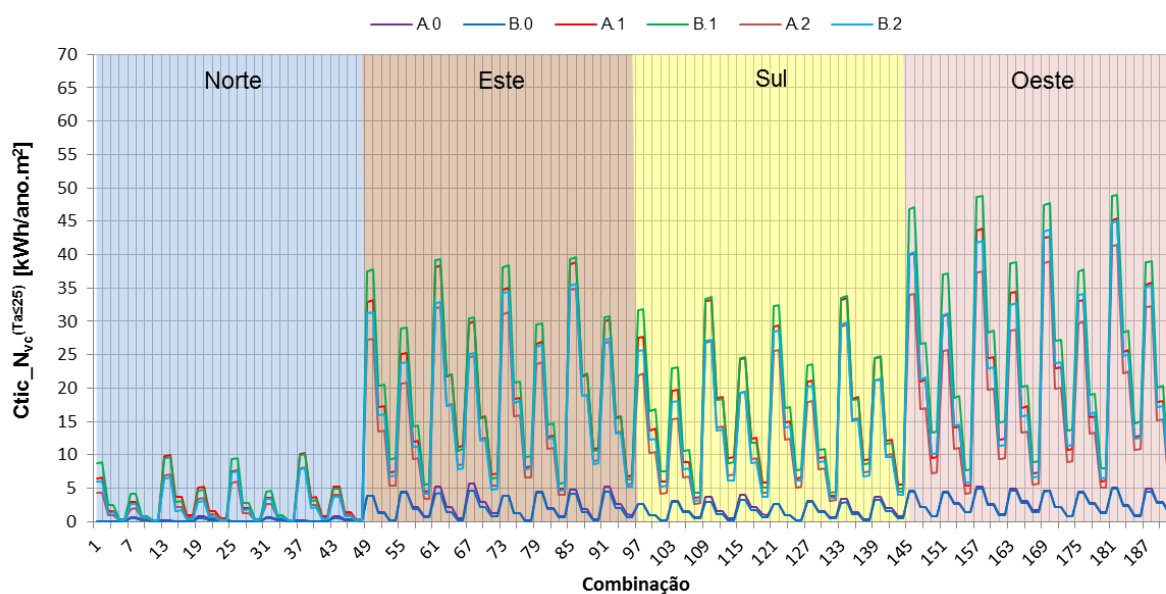


Fig.4.61. – Resultados obtidos para a função de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$  no Porto

Após a observação de todos os gráficos, com os resultados, obtidos foi possível tirar as seguintes conclusões:

- Que o programa de simulação estava a funcionar corretamente e que todo o procedimento automático utilizado em relação às diferentes variáveis consideradas no estudo também estava a funcionar;
- Nos gráficos observa-se que existe sensibilidade em relação às diferentes combinações, adotadas;
- Nos gráficos observa-se que existe sensibilidade em relação aos diferentes tipos de espaço em estudo. Quanto mais exposto for, em relação ao exterior mais elevados serão os Graus-hora de

desconforto  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e a necessidade nominal de energia útil para aquecimento  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ . Pelo contrário, quanto menor for a exposição ao exterior, espaço B com apenas uma fachada, mais elevados serão os Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e a necessidade nominal de energia útil para arrefecimento  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$ ;

- Podemos também observar que os espaços em contato com o solo são mais exigentes em relação aos Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e à necessidade nominal de energia útil para aquecimento  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$  e menos exigentes na estação de arrefecimento.
- Nos gráficos observa-se que existe sensibilidade em relação à orientação para os espaços em estudo. Na estação de aquecimento é mais exigente a Norte e menos exigente a Sul, durante a estação de arrefecimento é mais exigente a Este e a Oeste e menos exigente a Norte;
- É possível verificar que em relação à localização geográfica é em Bragança (Zona Climática I<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>) que durante a estação de aquecimento se verificam valores mais elevados para os Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e para a necessidade nominal de energia útil para aquecimento  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ . Na estação de arrefecimento é em Évora (Zona Climática I<sub>1</sub>, V<sub>3</sub>) que se verificam-se valores mais elevados para os Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e para a necessidade nominal de energia útil para arrefecimento  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$ . Para o Porto (Zona Climática I<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>), na estação de arrefecimento verificam-se valores mais baixos para os Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e para a necessidade nominal de energia útil  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$  e na estação de aquecimento verificam-se valores muito mais baixos para os Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$ , e para a necessidade nominal de energia útil  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$ , do que em Bragança mas um pouco superiores a Évora.

Uma análise paramétrica mais específica e aprofundada das funções de avaliação do desempenho será apresentada no capítulo 5 desta Tese.

# 5

## MODELO DE SELEÇÃO

### 5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

No capítulo 4 desta Dissertação, simulação numérica, foi descrito o procedimento de criação e validação de modelos geométricos de simulação computacional de um edifício de habitação também aplicável a pequenos edifícios de serviços. Foram ainda definidas e calculadas funções de avaliação do desempenho, dependentes das 15 variáveis em estudo, que caracterizam o comportamento térmico da geometria e dos principais elementos que constituem os vãos envidraçados em função da sua orientação, constituição da envolvente e localização geográfica dos espaços onde estão aplicados.

Assim, qualquer processo de seleção das características dos vãos envidraçados a aplicar em edifícios de habitação ou pequenos edifícios de serviços deve ser realizada tendo em consideração as características do edifício (elementos construtivos, profundidade e localização do espaço onde estão instalados no edifício), a sua localização geográfica e as características dos elementos que constituem o vão envidraçado em função da sua área e orientação, de modo a obter-se o valor mínimo, solução ótima (através de um processo de otimização), para as funções de avaliação do desempenho e, por outro lado, que possam ser sempre aplicáveis sem custos elevados e com baixo consumo energético.

Os resultados obtidos permitem que essa análise possa ser anual ou apenas para a estação de aquecimento ou de arrefecimento e ter em consideração o tipo de controlo da temperatura interior: sem e com climatização.

Realizou-se também uma análise de sensibilidade que permitiu observar a evolução da temperatura do ar, da temperatura média radiante e da temperatura superficial no cento do vidro e a sensibilidade nos espaços em relação à aplicação das funções de avaliação do desempenho para a estação de aquecimento e para estação de arrefecimento. Desta forma, verificou-se que o programa de simulação e todo o procedimento automático utilizado em relação às diferentes variáveis consideradas nas simulações funcionou corretamente.

O objetivo final é selecionar a solução ótima para os vãos envidraçados, procurando as melhores características para os elementos que os constituem (sombreamento por elementos exteriores, caixilho, tipo e características dos vidros, relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) e utilização de dispositivos de proteção solar) associados às características e localização do espaço onde estão instalados no edifício e geográfica, para diferentes orientações.

O cumprimento deste objetivo fulcral, para esta tese, revelou-se uma tarefa extremamente complexa. Por um lado, foi necessário recorrer a uma ferramenta específica de análise de dados para analisar os resultados das funções de avaliação do desempenho. Por outro lado, os modelos matemáticos de otimização que inicialmente foram utilizados não tinham capacidade para tratar o elevado número de



combinações obtido. Face ao elevado número de variáveis em estudo e ao elevado número de resultados obtidos para cada função de avaliação do desempenho, não foi possível utilizar o Solver do programa Excel e o programa MatLab [140], uma vez que não tinham capacidade para executar o modelo matemático de otimização.

Para resolver esse problema foi criado um ficheiro de texto com todos os resultados das funções de avaliação do desempenho com 1 119 744 linhas de dados, que pode ser lido pelo programa QlikView [141], programa que permite analisar todos os resultados das funções de avaliação do desempenho, e por um programa comercial da coleção GAMS (*General Algebraic Modeling System*), o programa Cplex, que permite obter a solução ótima do problema de otimização subjacente ao modelo matemático em questão [142].

O programa Cplex da coleção GAMS será utilizado para validar os resultados obtidos pelo programa QlikView, aquando da apresentação da proposta dos modelos de seleção, ponto §5.4 deste capítulo, quando se pretender obter as soluções otimizadas em relação às características dos vãos envidraçados através da utilização de um modelo matemático de otimização.

O programa QlikView, ferramenta de *Business Intelligence* (BI), será utilizado para apresentar e analisar os resultados das funções de avaliação do desempenho e o modelo de seleção a propor. É também utilizado para fazer a apresentação e análise dos resultados obtidos para todas as funções de avaliação do desempenho por via gráfica.

Para se criar o modelo simplificado de seleção foram realizadas as seguintes etapas:

- Criar a base de dados com todos os resultados das funções de avaliação do desempenho;
- Inserir a base de dados no programa QlikView e criar uma interfase gráfica de modo a apresentar todas as variáveis e respetivas opções, de forma a permitir a sua seleção e a forma como os resultados são apresentados em gráficos;
- Realizar uma análise paramétrica para as várias opções das variáveis em estudo relacionadas com as características dos vãos envidraçados permitindo comparar graficamente o seu desempenho, para um determinado tipo de edifício, utilizando o programa QlikView;
- Propor um modelo de seleção das características dos vãos envidraçados, de modo, obter-se a solução ótima, obtendo-se a solução que minimize as funções de avaliação do desempenho, recorrendo-se a gráficos apresentados no programa QlikView para esse efeito através da seleção de uma sequência de variáveis, para ambos os tipos de controlo da temperatura interior, sem climatização e com climatização. Para validar os resultados obtidos foi utilizado o programa Cplex da coleção GAMS;
- Apresentar um exemplo de aplicação para apoiar o utilizador na aplicação do modelo de seleção proposto. Onde se apresenta uma análise paramétrica das variáveis em estudo relacionadas com os vãos envidraçados para várias opções, permitindo visualizar graficamente o seu desempenho comparativamente com a solução ótima, para cada estação e aferir das restantes funções de avaliação do desempenho relacionadas com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e com a temperatura superficial no centro do vidro ( $T_s$ ), desconforto local.



## 5.2. OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 5.2.1. INTRODUÇÃO

Um dos objetivos deste trabalho consiste em determinar as soluções ótimas relativas à concepção dos vãos envidraçados, esta análise pode ser anual ou por estação (aquecimento ou arrefecimento). Os objetivos associados à otimização são a melhoria do desempenho térmico, do conforto térmico no interior dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços e, desta forma, melhorar também a sua eficiência energética, para dois tipos de controlo da temperatura interior, sem climatização (Ctis) e com climatização (Ctic), respetivamente, para aquecimento e para arrefecimento.

Na realidade vão ser propostos dois modelos de seleção, um para cada tipo de controlo da temperatura interior, sem climatização e com climatização.

Para avaliar adequadamente o efeito de uma determinada solução no desempenho do edifício foi necessário recorrer a uma ferramenta computacional de simulação de edifícios, neste caso o *EnergyPlus*. Para que as soluções otimizadas sejam realmente as melhores soluções, o algoritmo de otimização multiobjetivo requer inúmeras simulações de modelos complexos, por longos períodos de tempo (simulação anual), este procedimento tornou-se muito demorado e exigente em termos computacionais. Entre o processo de simulação e de tratamento dos resultados foram produzidos cerca de 7 TB de dados.

Como já foi referido anteriormente, após se ter simulado todas as combinações, 2 239 488 (1 119 744\_Ctis e 1 119 744\_Ctic) e calculadas todas as funções de avaliação do desempenho, 20 (10\_Ctis e 10\_Ctic), os resultados obtidos foram inseridos num ficheiro de texto com extensão “csv”, num total de 1 119 744 linhas de dados, de forma a ser lido pelo programa QlikView e pelo programa Cplex da coleção GAMS. No programa QlikView foi criada uma interface gráfica, constituída por vários Separadores, que permite apresentar e analisar os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho por duas abordagens:

- Realizar uma análise paramétrica as várias opções das variáveis em estudo relacionadas com as características dos vãos envidraçados para determinadas características do espaço, permitindo comparar graficamente o seu desempenho;
- Propor um modelo de seleção: os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho selecionadas relativas às características dos vãos envidraçados podem ser comparados entre si, por forma a se obter o valor mínimo. Permitindo que essa análise possa ser anual ou apenas para a estação de aquecimento ou de arrefecimento e ter em consideração o tipo de controlo da temperatura interior: sem e com climatização.

Paralelamente, como já foi referido, este último ponto será validado com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS.

Se o utilizador assim o pretender, também é possível realizar análises paramétricas para as várias opções das variáveis em estudo relacionadas com as características dos espaços em função das características dos vãos envidraçados permitindo comparar graficamente o seu desempenho.

A otimização é um processo de procura e comparação de soluções admissíveis de um determinado problema, que tem por objetivo determinar a melhor solução (solução ótima) desse problema.

Um programa de otimização multiobjetivo é um problema de decisão onde estão presentes dois ou mais objetivos habitualmente conflituosos entre si. A principal diferença face à otimização com apenas um objetivo reside no facto de nos problemas multiobjetivo não existir apenas uma solução ótima mas

sim um conjunto de soluções, onde cada uma representa um compromisso entre diferentes funções de avaliação do desempenho em estudo (soluções de pareto).

A resolução de um problema de otimização multiobjetivo é matematicamente complexa e na maioria das situações resulta num procedimento muito demorado e exigente em termos computacionais. A forma corrente de evitar esta complexidade é transformar a otimização multiobjetivo num problema com apenas um objetivo através da adoção de uma única função objetivo que agregue todas as funções objetivo, afetando-as de uma ponderação (peso) que caracterize a importância dada a cada uma delas. O problema desta metodologia é ser bastante subjetiva, uma vez que deixa à responsabilidade do decisor a definição dos pesos a dar a cada função objetivo, assumindo que este tem que ter um conhecimento antecipado da importância relativa dos mesmos.

Devido a grande quantidade de dados em análise e para que também se possa fazer uma análise anual, neste trabalho optou-se por utilizar a otimização com apenas um objetivo através da adoção de uma única função objetivo que agregue as funções objetivo selecionadas, afetando-as de uma ponderação que caracterize a importância dada a cada uma delas, por parte do utilizador (decisor).

### 5.2.2. PROGRAMA CPLEX DA COLEÇÃO GAMS

O Cplex que é um programa da coleção GAMS (*General Algebraic Modeling System*) [142] será utilizado para validar os resultados obtidos pelo programa QlikView [141], quando se pretender obter a solução ótima do problema de otimização subjacente à formulação matemática utilizada, apresentada nos pontos §5.4.2.1 e 5.4.2.2 deste capítulo.

O problema de otimização, descrito neste capítulo, consiste em determinar de entre as várias combinações possíveis,  $N_c$ , resultantes das combinações dos diferentes valores que cada parâmetro pode tomar, aquela que minimiza o desconforto pré-estabelecido.

Designado por  $N_p$  o número total de parâmetros e por  $N_i$  o número de opções pré-definidas para cada parâmetro  $i$ , o número de combinação,  $N_c$ , é dado por  $\prod_{i=1}^{N_p} N_i$ .

No modelo matemático subjacente a este problema, é incorporado um vetor  $y$  onde cada componente  $y_k$  está associada à combinação  $k$  e assume o valor 1 ou 0 consoante essa combinação corresponde ou não à solução ótima pretendida. Além disso, uma nova variável binária  $x$  é adicionada ao modelo, onde cada componente  $x_{ij}$  está associada à opção  $j$  do parâmetro  $i$  e assume o valor 1 ou 0 consoante pertence ou não à solução final.

Convém salientar que,:

- apenas uma opção de cada parâmetro  $i$  deverá pertencer à solução final. Esta condicionante é equivalente a considerar que as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} = 1, \quad i=1, \dots, N_p \quad (5.1.)$$

- para cada combinação  $k$ , o número total de opções selecionadas é sempre não superior ao número de parâmetros,  $N_p$ . Será igual a esse valor, caso essa combinação seja a solução ótima.

Assim, de forma a identificar a combinação  $k$  associada a esse conjunto de opções, o seguinte conjunto de restrições é tido em consideração:

$$\sum_{i=1}^{Np} \sum_{j=1}^{N_i} A_{kij} x_{ij} - y_k \leq Np - 1, \quad k = 1, \dots, Nc \quad (5.2.)$$

onde  $A_{kij}$  é igual a um ou a zero, caso a opção  $j$  do parâmetro  $i$  pertença ou não a combinação  $k$ , respetivamente.

Como o objetivo do modelo é encontrar de entre as várias combinações possíveis aquela que minimiza o desconforto pré-definido, a função objetivo pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{k=1}^{Nc} C_k^{trans} \cdot y_k \quad (5.3.)$$

onde  $C_k^{trans}$  é um parâmetro normalizado de desconforto total associado à combinação  $k$ .

De acordo com a descrição das restrições e da função objetivo apresentadas nesta secção, o modelo pode ser formulado como o seguinte programa linear inteiro 0-1:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar} \quad \sum_{k=1}^{Nc} C_k^{trans} \cdot y_k \\ &\text{sujeito a} \quad \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} = 1 \\ &\quad \sum_{i=1}^{Np} \sum_{j=1}^{N_i} A_{kij} x_{ij} - y_k \leq Np - 1 \\ &\quad y_k \in \{0,1\} \\ &\quad x_{ij} \in \{0,1\} \end{aligned}$$

onde  $i \in \{1, \dots, Np\}$ ,  $k \in \{1, \dots, Nc\}$  e  $j \in \{1, \dots, N_i\}$ .

Neste programa de otimização os parâmetros (ou dados) do problema têm os seguintes significados:

$Np$	número de parâmetros;
$N_i$	número de opções para o parâmetro $i$ ;
$Nc$	número de combinações;
$C_k^{trans}$	parâmetro normalizado de desconforto total para a combinação $k$ ;
$A_{kij}$	assume o valor um ou zero, caso a opção $j$ do parâmetro $i$ pertença ou não a combinação $k$ , respetivamente.

As variáveis do problema e as suas definições são apresentadas a seguir:

$y_k$  variável que toma o valor 1 ou 0 consoante essa combinação corresponde ou não à solução ótima pretendida;

$x_{ij}$  variável que toma o valor 1 ou 0 conforme a opção  $j$  do parâmetro  $i$  está ou não na solução final.

Podemos assim concluir que o programa contém  $N_c + \sum_{i=1}^{N_p} N_i$  variáveis e  $N_c + N_p$  restrições.

Mais uma vez se relembra, que neste modelo está implícito que a tomada de decisão é feita antes da procura, uma vez que a ponderação atribuída aos objetivos, por parte do utilizador, vai condicionar a solução final. A resolução deste problema com apenas um objetivo conduz a uma única solução ótima.

### 5.2.3. PROGRAMA QLIKVIEW

#### 5.2.3.1. Considerações Gerais Sobre o Programa QlikView

O programa QlikView [141] é uma ferramenta de *Business Intelligence* (BI) vocacionada para a análise de grandes quantidades de dados, através de gráficos, diagramas e tabelas, numa interface gráfica que podemos criar de acordo com as nossas necessidades, permitindo uma fácil observação e análise dos resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho.

O programa QlikView tem capacidade para ler a base de dados com o resultado de todas as funções de avaliação do desempenho em análise e permite a utilização de expressões matemáticas para as relacionar entre si.

Na figura 5.1 estão representadas as variáveis consideradas (caraterísticas do espaço – 7, caraterísticas do vão envidraçado – 7 e 1 – tipo de controlo da temperatura interior) e as respetivas opções e um gráfico com uma análise dos resultados obtidos. É ainda apresentado, um gráfico, para cada localização com o valor máximo obtido para a função em análise e o valor máximo desta em função das opções selecionadas. Se tivermos várias opções selecionadas (em relação a uma dada variável), e se assim o pretendermos, é apresentado o valor médio para todas as opções.

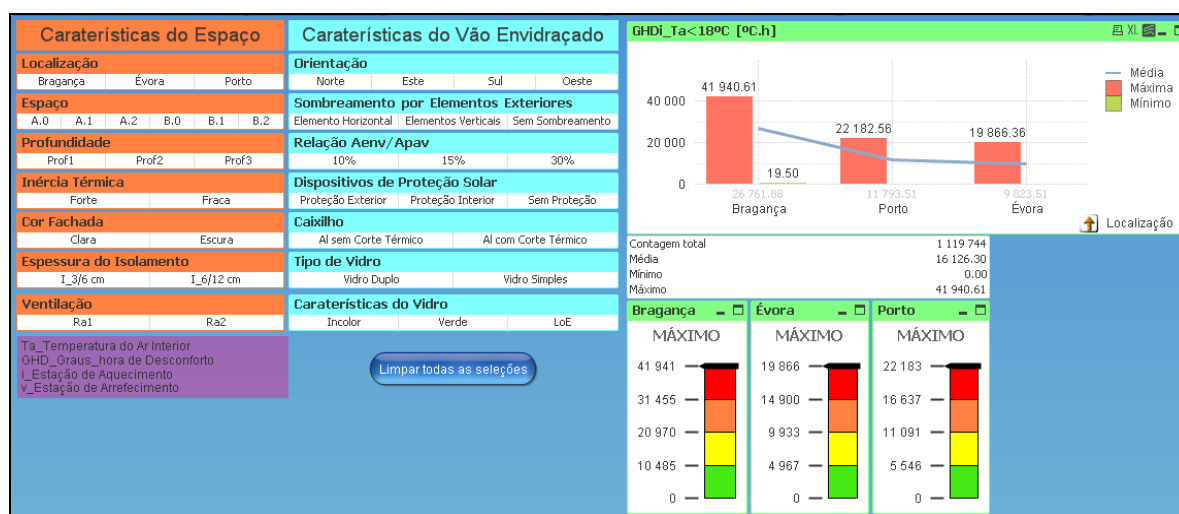


Fig.5.1. – Apresentação da análise dos resultados obtidos no programa QlikView: à esquerda as caraterísticas e as respetivas opções (não selecionadas) e à direita a apresentação gráfica dos resultados

Como nenhuma opção está selecionada o gráfico apresenta o valor máximo e mínimo de todas as opções e o valor médio tendo em consideração todas as opções, apresentando a contagem total de 1 119 744 combinações, para cada função em estudo. No caso em que, para todas as variáveis esteja selecionada uma opção, o gráfico apresentará o valor obtido para essa combinação, apresentando a contagem total de 1 combinação (valor único – todos os valores apresentados no gráfico são iguais).

#### 5.2.3.2. Apresentação e Análise de Resultados no Programa QlikView

No programa QlikView [141] foi criada uma interface gráfica, apresentada no Anexo D, onde são apresentados os gráficos com os resultados das funções de avaliação do desempenho, organizada por separadores da seguinte forma:

- Apresentação e análise dos resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico no interior dos espaços simulados, sem climatização:
  - Ctis\_Modelo de Seleção Proposta do Modelo de Seleção de Vãos Envidraçados para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com temperatura do ar interior dos espaços simulados, sem climatização;
  - Ctis\_GHD\_Ta Graus-hora de desconforto devido à temperatura do ar interior (°C.h) na estação de aquecimento e de arrefecimento;
  - Ctis\_GHD\_Tmr Graus-hora de desconforto devido à temperatura média radiante (°C.h) na estação de aquecimento e de arrefecimento;
  - Ctis\_GHD\_Ta\_Tmr: Comparação Permite comparar em função das opções selecionadas relativas às variáveis em estudo os Graus-hora de desconforto devido à temperatura do ar interior e à temperatura média radiante (°C.h) na estação de aquecimento e de arrefecimento;
  - Ctis\_NHD\_|Ts-Ta| Número de horas com desconforto Graus-hora de desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro (h) na estação de aquecimento e de arrefecimento.
- Apresentação e análise dos resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico no interior dos espaços simulados, com climatização:
  - Ctic\_Modelo de Seleção Proposta do Modelo de Seleção de Vãos Envidraçados para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com as Necessidade nominal de energia útil para climatização (aquecimento,  $N_{ic}$ , e arrefecimento,  $N_{vc}$ );
  - Ctic\_Nic\_Nvc Necessidade nominal de energia útil (kWh/ano.m<sup>2</sup>) para aquecimento e arrefecimento;

- Ctic\_GHD\_Ta Graus-hora de desconforto devido à temperatura do ar interior (°C.h) na estação de aquecimento e de arrefecimento;
  - Ctic\_GHD\_Tmr Graus-hora de desconforto devido à temperatura média radiante (°C.h) na estação de aquecimento e de arrefecimento;
  - Ctic\_GHD\_Ta\_Tmr: Comparação Permite comparar em função das opções seleccionadas relativas às variáveis em estudo os Graus-hora de desconforto devido à temperatura do ar interior e à temperatura média radiante (°C.h) na estação de aquecimento;
  - Ctic\_NHD\_[Ts-Ta] Número de horas com desconforto Graus-hora de desconforto devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro (h) na estação de aquecimento e de arrefecimento.
- Apresentação e análise dos dados climáticos para as três localizações em análise:
    - Dados Climáticos Temperatura exterior (°C), Direção e Velocidade do Vento (m/s), Humidade relativa (%) e Radiação Global em Superfície Horizontal e Radiação Direta Normal (Wh/m<sup>2</sup>).

As opções seleccionadas relativas às variáveis em estudo (Caraterísticas dos Espaços e Caraterísticas dos Vãos Envidraçados) são validas para todos os separadores, logo analisar o desempenho das funções de avaliação do desempenho o decisor apenas terá que mudar para o separador pretendido.

### 5.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS CARATERÍSTICAS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

#### 5.3.1. INTRODUÇÃO

Neste ponto pretende apresentar-se uma análise paramétrica da influência utilizando-se o programa QlikView, para as várias opções das variáveis em estudo relacionadas com as caraterísticas dos vãos envidraçados para determinadas caraterísticas do espaço, para todas as funções de avaliação do desempenho, permitindo comparar graficamente o seu desempenho, nomeadamente:

- Orientação;
- Relação Aenv/Ap (Ae);
- Sombreamento por elementos exteriores;
- Tipo de Caixilho;
- Tipo de Vidro;
- Caraterísticas do Vidro;
- Dispositivos de Proteção Solar.

Na figura 5.2, retirada do programa QlikView, estão assinaladas as opções seleccionadas relativas às caraterísticas do espaço, representadas a verde, nomeadamente:

- Localização geográfica: Évora;
- Espaço que servem: A.2;
- Profundidade dos espaços: Prof2;
- Inércia térmica: Forte;
- Cor da fachada: Clara;
- Espessura do isolamento térmico: I<sub>6/12</sub> cm;
- Ventilação: Ra1.

Caraterísticas do Espaço					
Localização					
Bragança	Évora		Porto		
Espaço					
A.0	A.1	A.2	B.0	B.1	B.2
Profundidade					
Prof1	Prof2		Prof3		
Inércia Térmica					
Forte			Fraca		
Cor Fachada					
Clara			Escura		
Espessura do Isolamento					
I <sub>3/6</sub> cm		I <sub>6/12</sub> cm			
Ventilação					
Ra1			Ra2		

Fig.5.2. – Caraterísticas do Espaço com as opções selecionadas

### 5.3.2. RELAÇÃO $A_{ENV}/A_P$ (AE)

Na figura 5.3 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência da relação entre a área do vão envidraçado ( $A_{env}$ ) e a área do pavimento ( $A_p$ ) – ( $A_e$ ), respetivamente, 10%, 15% e 30%, para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto  $C_{tis\_GHD\_Ta}$  e  $C_{tis\_GHD\_Tmr}$  e Necessidade nominal de energia útil para aquecimento e arrefecimento  $C_{tic\_Nic\_Nvc}$ , representadas a verde. Nas figuras 5.4 a 5.6 é apresentada a análise paramétrica da influência da  $A_e$ , em função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço	Caraterísticas do Vão Envidraçado	Caraterísticas do Vão Envidraçado
Localização	Orientação	Orientação
Bragança Évora Porto	Norte Este Sul Oeste	Norte Este Sul Oeste
Espaço	Sombreamento por Elementos Exteriores	Sombreamento por Elementos Exteriores
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento
Profundidade	Relação $A_{env}/A_{pav}$	Relação $A_{env}/A_{pav}$
Prof1 Prof2 Prof3	10% 15% 30%	10% 15% 30%
Inércia Térmica	Dispositivos de Proteção Solar	Dispositivos de Proteção Solar
Forte Fraca	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção
Cor Fachada	Tipo de Caixilho	Tipo de Caixilho
Clara Escura	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico
Espessura do Isolamento	Tipo de Vidro	Tipo de Vidro
I <sub>3/6</sub> cm I <sub>6/12</sub> cm	Vidro Duplo Vidro Simples	Vidro Duplo Vidro Simples
Ventilação	Caraterísticas do Vidro	Caraterísticas do Vidro
Ra1 Ra2	Incolor Verde LoE	Incolor Verde LoE

Fig.5.3 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência da  $A_e$ , por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.4 – Análise paramétrica da influência da  $A_e$  para as funções  $C_{tis\_GHD\_Ta}$  e  $C_{tis\_GHD\_Tmr}$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.5 – Análise paramétrica da influência da  $A_e$  para as funções  $C_{tis\_GHD\_Ta}$  e  $C_{tis\_GHD\_Tmr}$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste



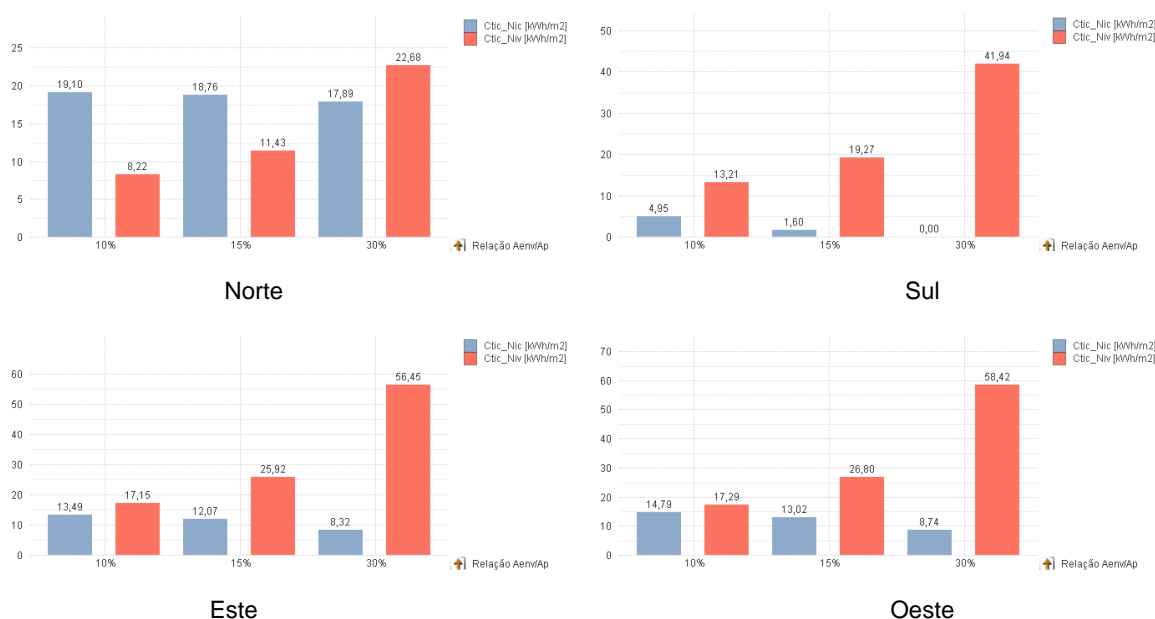


Fig.5.6 – Análise paramétrica da influência da Ae para as funções Ctíc\_Nic e Ctíc\_Nvc em função da orientação dos vãos envidraçados

Ao observar as figuras 5.4 e 5.5 podemos concluir que na estação de aquecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr<18)}$  diminuem em proporção com o acréscimo da Ae, os valores mais elevados foram obtidos quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte, com um decréscimo menor, quando se aumenta a área do vão envidraçado, em relação às outras orientações, e os mais baixos foram obtidos quando estes estão orientados a Sul com um decréscimo maior, chegando mesmo a zero para combinação em análise para uma Ae de 30%. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ). Já os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr>25)}$ , com estas funções pretendesse avaliar o sobreaquecimento, aumentam na estação de aquecimento, os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ) são inferiores aos relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ), o que indica que o sobreaquecimento se faz sentir de imediato na temperatura do ar e só depois nos elementos da envolvente.

Na estação de arrefecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Tmr>25)}$  aumentam em proporção com o acréscimo da Ae, os valores mais elevados foram obtidos quando os vãos envidraçados estão orientados a Oeste e a Este e os mais baixos foram obtidos quando estes estão orientados a Norte. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ).

Ao observar a figura 5.6 podemos concluir que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctíc\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$  e  $Ctíc\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$  têm um desenvolvimento muito similar às funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ . Durante a estação de aquecimento os vãos envidraçados que estão orientados a Norte com o acréscimo da Ae a melhoria do desempenho não é muito significativa. Durante a estação de arrefecimento é nos vãos envidraçados estão orientados a Oeste e Este que se verifica um acréscimo muito significativo com o acréscimo da Ae nas necessidades nominais de energia útil para arrefecimento.

A função de avaliação do desempenho relacionada com as necessidades nominais de energia útil para aquecimento,  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  é mais baixas quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul e mais elevadas quando estes estão orientados a Norte.

A função de avaliação do desempenho relacionada com as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento,  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$ , é mais baixas quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte e mais elevadas quando estes estão orientados a Este e a Oeste.

Nos quadros 5.1 e 5.2 é apresentada a análise paramétrica da influência da Ae, respetivamente, 10%, 15% e 30%, para todas as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, em função da orientação do vão envidraçado, sem e com climatização.

Quadro 5.1. - Análise paramétrica da influência da Ae em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	10%	15%	30%	10%	15%	30%	10%	15%	30%	10%	15%	30%
$Ctis\_GHD_i^{(Ta < 18)}$	11880	11126	9314	8242	6950	3928	2558	494	0	9062	7509	4100
$Ctis\_GHD_i^{(Ta > 25)}$	12	38	169	294	580	1722	582	1370	8617	227	522	1722
$Ctis\_GHD_v^{(Ta > 25)}$	4698	6383	11324	10269	14855	27961	7683	10744	20348	10305	15276	29034
$Ctis\_GHD_i^{(Tmr < 18)}$	11451	10531	8521	7475	6030	2831	1464	83	0	8350	6638	2974
$Ctis\_GHD_i^{(Tmr > 25)}$	0	20	232	433	805	2408	817	2054	11697	338	723	2408
$Ctis\_GHD_v^{(Tmr > 25)}$	5348	7430	13277	11996	17224	31669	8851	12513	23285	12039	17699	32852
$Ctis\_NHD_i^{( Ta-Ts  > 5)}$	0	0	0	2	5	96	58	113	1211	21	18	132
$Ctis\_NHD_v^{( Ta-Ts  > 5)}$	1	4	53	35	106	679	34	78	360	130	224	902
$Ctis\_NHD_i^{( Ta-Ts  > 10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Ctis\_NHD_v^{( Ta-Ts  > 10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]

Quadro 5.2. - Análise paramétrica da influência da Ae em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	10%	15%	30%	10%	15%	30%	10%	15%	30%	10%	15%	30%
$Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$	19,10	18,76	17,89	13,49	12,07	8,32	4,95	1,60	0,00	14,79	13,02	8,74
$Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$	8,22	11,43	22,68	17,15	25,92	56,45	13,21	19,27	41,94	17,29	26,80	58,42
$Ctic\_GHD_i^{(Ta > 25)}$	0	3	55	68	213	1046	226	766	7469	54	177	1055
$Ctic\_GHD_i^{(Tmr < 18)}$	1822	1713	1571	1010	737	365	68	1	0	1213	882	340
$Ctic\_GHD_i^{(Tmr > 25)}$	0	0	44	100	319	1580	343	1271	10417	46	260	1580
$Ctic\_GHD_v^{(Tmr > 25)}$	1327	2006	3888	3105	4367	8004	2275	3329	6355	3105	4473	8556
$Ctic\_NHD_i^{( Ta-Ts  > 5)}$	273	281	371	188	185	250	112	131	1146	239	219	309
$Ctic\_NHD_v^{( Ta-Ts  > 5)}$	9	9	9	87	87	87	142	142	142	334	334	334
$Ctic\_NHD_i^{( Ta-Ts  > 10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Ctic\_NHD_v^{( Ta-Ts  > 10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota:  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

### 5.3.3. SOMBREAMENTO POR ELEMENTOS EXTERIORES

Na figura 5.7 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores, para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD\_Ta$  e  $Ctis\_GHD\_Tmr$  e Necessidade nominal de energia útil para aquecimento e arrefecimento  $Ctic\_N_{ic}$  e  $N_{vc}$ , representadas a

verde. Nas figuras 5.8 e 5.10 é apresentada a análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores, em função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço	Caraterísticas do Vão Envidraçado	Caraterísticas do Vão Envidraçado
<b>Localização</b>	<b>Orientação</b>	<b>Orientação</b>
Bragança Évora Porto	Norte Este Sul Oeste	Norte Este Sul Oeste
<b>Espaço</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento
<b>Profundidade</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>
Prof1 Prof2 Prof3	10% 15% 30%	10% 15% 30%
<b>Inércia Térmica</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>
Forte Fraca	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção
<b>Cor Fachada</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>
Clara Escura	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico
<b>Espessura do Isolamento</b>	<b>Tipo de Vidro</b>	<b>Tipo de Vidro</b>
I_3/6 cm I_6/12 cm	Vidro Duplo Vidro Simples	Vidro Duplo Vidro Simples
<b>Ventilação</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>
Ra1 Ra2	Incolor Verde LoE	Incolor Verde LoE

Fig.5.7 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.8 – Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções Ctis\_GHD\_Ta e Ctis\_GHD\_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul

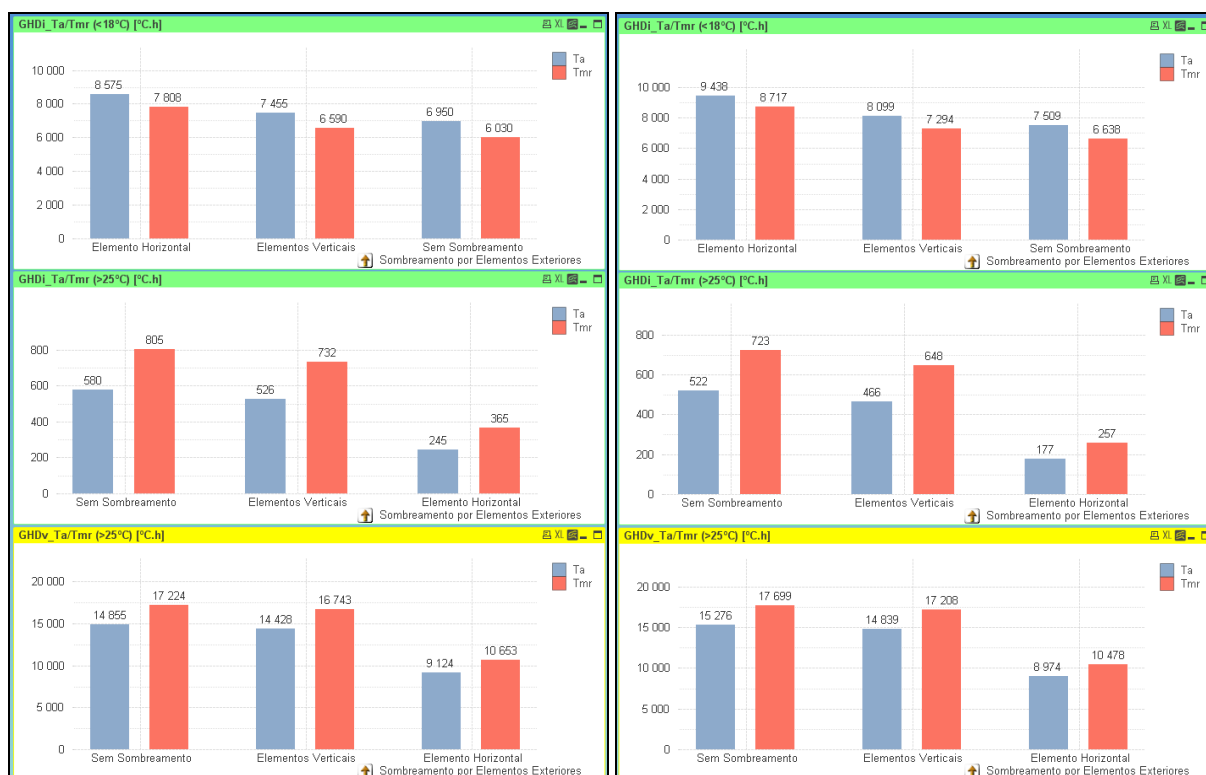


Fig.5.9 – Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste

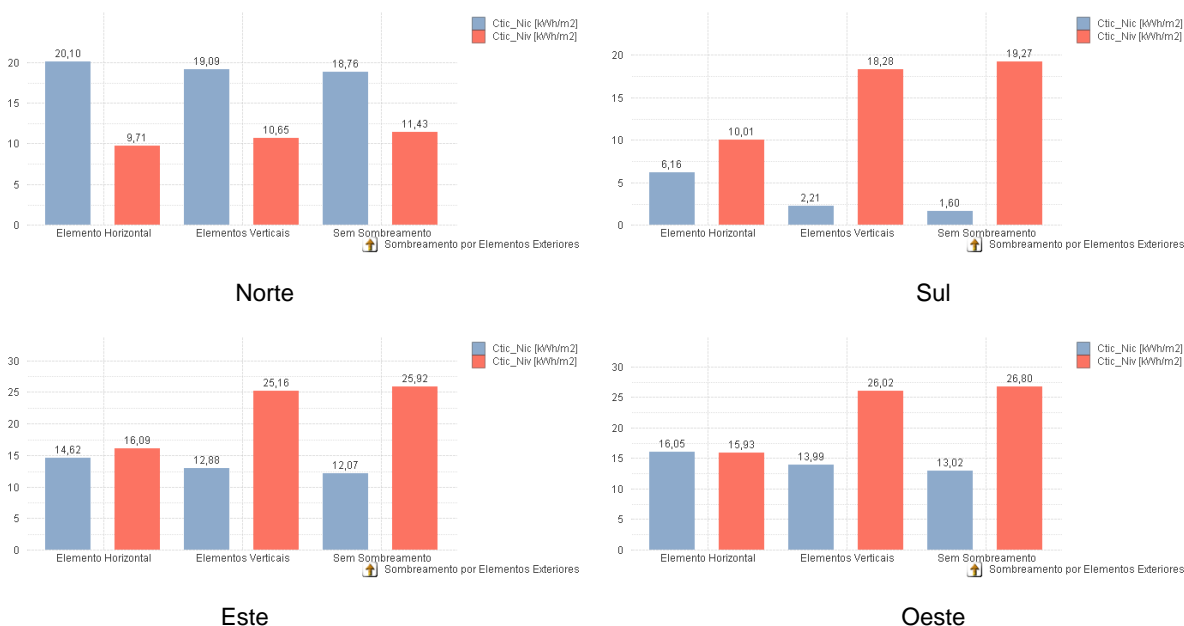


Fig.5.10 – Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores para as funções Ctic\_Nic e Ctic\_Nvc em função da orientação dos vãos envidraçados

Nos quadros 5.3 e 5.4 é apresentada a análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores, respetivamente, Elemento Horizontal (SEh), Elementos Verticais (SEv) e Sem Sombreamento (SEs), para todas as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, em função da orientação do vão envidraçado, sem e com climatização.

Quadro 5.3. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	11945	11329	11126	8575	7455	6950	3187	765	494	9438	8099	7509
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	19	31	38	245	526	580	82	1106	1370	177	466	522
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	5340	5911	6383	9124	14428	14855	5516	10194	10744	8974	14839	15276
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	11486	10765	10531	7808	6590	6030	1999	202	83	8717	7294	6638
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	3	12	20	365	732	805	100	1644	2054	257	648	723
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	6114	6846	7430	10653	16743	17224	6320	11862	12513	10478	17208	17699
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	0	0	0	0	4	5	0	76	113	0	13	18
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	2	2	4	4	82	6	2	59	78	10	192	124
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]

Quadro 5.4. - Análise paramétrica da influência do Sombreamento por Elementos Exteriores em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs	SEh	SEv	SEs
Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	20,10	19,09	18,76	14,62	12,88	12,07	6,16	2,21	1,60	16,05	13,99	13,02
Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	9,71	10,65	11,43	16,09	25,16	25,92	10,01	18,28	19,27	15,93	26,02	26,80
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	1	2	3	65	184	213	18	580	766	48	149	177
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	1941	1766	1713	1148	870	737	128	5	1	1362	1044	882
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	0	0	90	277	319	8	949	1271	34	216	260
Ctic_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	1594	1830	2006	2853	4262	4367	1664	3150	3329	2788	4364	4473
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	203	265	281	133	178	185	64	102	131	162	215	219
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	10	8	9	12	82	87	17	129	142	123	324	334
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: N<sub>ic</sub> e N<sub>vc</sub> [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

No geral, podemos observar que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho diminuem na estação de aquecimento, com exceção das funções Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta>25)</sup>, Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr>25)</sup>, Ctis\_NHD<sub>i</sub><sup>(|Ta-Ts|>5)</sup>, Ctic\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta>25)</sup> e Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr>25)</sup>, e aumentam na estação de arrefecimento em relação à existência de elementos exteriores de sombreamento, respetivamente, Elemento Horizontal (SEh), Elementos Verticais (SEv) e Sem Sombreamento (SEs), sendo menos expressivo quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte.

Quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta>25)</sup>, Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr>25)</sup> e Ctis\_NHD<sub>i</sub><sup>(|Ta-Ts|>5)</sup> apresentam resultados mais elevados e com maior aumento e as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta<18)</sup> e Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr<18)</sup> apresentam resultados mais baixos e com maior diminuição com a existência de elementos exteriores de sombreamento, respetivamente, Elemento Horizontal (SEh), Elementos Verticais (SEv) e Sem Sombreamento (SEs).

Ao observar as figuras 5.8 e 5.9 podemos concluir que na estação de aquecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta<18)</sup> e Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr<18)</sup> são melhores

quando não existe qualquer elementos de exterior de sombreamento e pioram com na presença desses elementos, atingindo o valor mais elevado quando existe sombreamento por elementos horizontais. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ).

Já os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr>25)}$ , são piores quando não existe qualquer elementos exterior de sombreamento e melhoram com na presença dos elementos de exteriores de sombreamento, atingindo o valor mais baixo quando existe sombreamento por elementos horizontais.

Na estação de arrefecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Tmr>25)}$  são melhores na presença dos elementos exteriores de sombreamento, atingindo o valor mais baixo quando existe sombreamento por elementos horizontais.

Ao observar a figura 5.10 podemos concluir que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\geq 18)}$  e  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta\leq 25)}$  têm um desenvolvimento muito similar às funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ . Durante a estação de aquecimento a variação dos resultados obtidos para os vãos envidraçados que estão orientados a Norte, Este e Oeste não é muito significativa, sendo significativa quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul. Durante a estação de arrefecimento é nos vãos envidraçados estão orientados a Sul, Oeste e Este que se verifica um acréscimo muito significativo com a existência de elementos exteriores de sombreamento, por ordem crescente de desempenho, Sem Sombreamento (SEs), Elementos Verticais (SEv) e Elemento Horizontal (SEh).

#### 5.3.4. TIPO DE CAIXILHO

Na figura 5.11 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho, respetivamente, Alumínio sem Corte Térmico (Al sem Corte Térmico) e Alumínio com Corte Térmico (Al com Corte Térmico), para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD\_Ta$  e  $Ctis\_GHD\_Tmr$  e Necessidade nominal de energia útil para aquecimento e arrefecimento  $Ctic\_Nic\_Nvc$ , representadas a verde. Nas figuras 5.12 a 5.154 é apresentada a análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho, e m função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço	Caraterísticas do Vão Envidraçado	Caraterísticas do Vão Envidraçado
<b>Localização</b>	<b>Orientação</b>	<b>Orientação</b>
Bragança Évora Porto	Norte Este Sul Oeste	Norte Este Sul Oeste
<b>Espaço</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento
<b>Profundidade</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>
Prof1 Prof2 Prof3	10% 15% 30%	10% 15% 30%
<b>Inércia Térmica</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>
Forte Fraca	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção
<b>Cor Fachada</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>
Clara Escura	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico
<b>Espessura do Isolamento</b>	<b>Tipo de Vidro</b>	<b>Tipo de Vidro</b>
I_3/6 cm I_6/12 cm	Vidro Duplo Vidro Simples	Vidro Duplo Vidro Simples
<b>Ventilação</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>
Ra1 Ra2	Incolor Verde LoE	Incolor Verde LoE

Fig.5.11 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.12 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.13 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste

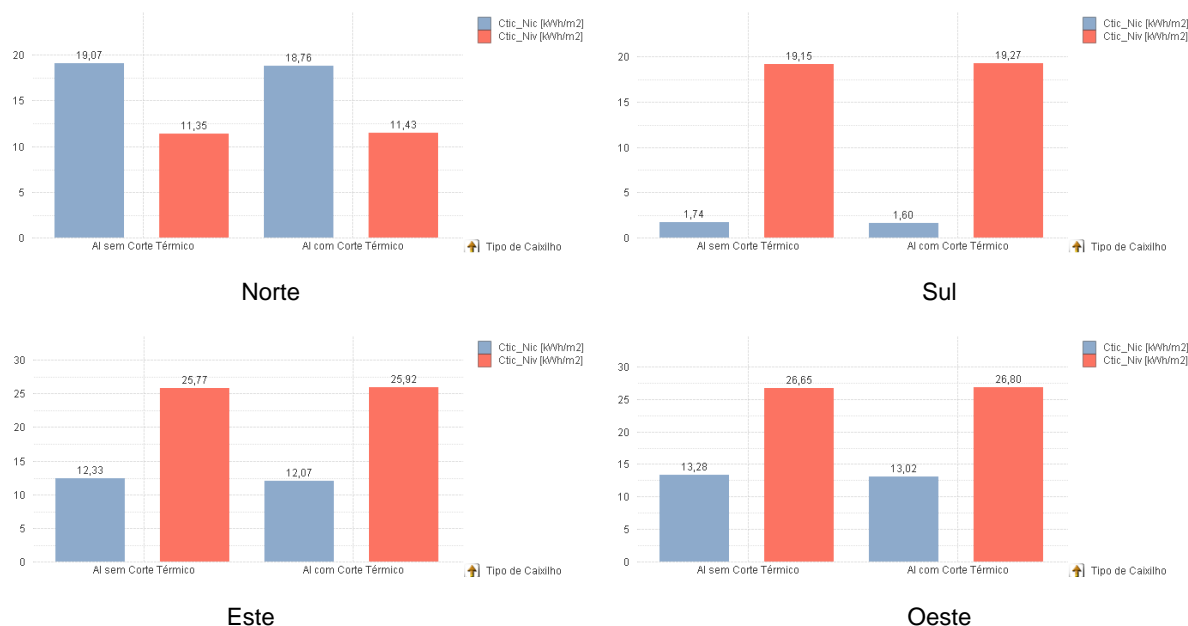


Fig.5.14 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho para as funções  $Ct_{ic\_Nic}$  e  $Ct_{ic\_Nvc}$  em função da orientação dos vãos envidraçados

No geral, podemos observar que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho são muito próximos, apresentando melhor desempenho com caixilho de Alumínio com Corte Térmico (Al cCT).

Nos quadros 5.5 e 5.6 é apresentada a análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho, respetivamente, Elemento Alumínio sem Corte Térmico (Al sCT) e Alumínio com Corte Térmico (Al cCT), para todas as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, em função da orientação do vão envidraçado, sem e com climatização.

Quadro 5.5. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação	Norte		Este		Sul		Oeste	
Função	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT
$Ct_{is\_GHD_i}^{(Ta<18)}$	11240	11126	7060	6950	548	494	7620	7509
$Ct_{is\_GHD_i}^{(Ta>25)}$	36	38	564	580	1327	1370	506	522
$Ct_{is\_GHD_v}^{(Ta>25)}$	6289	6383	14693	14855	10615	10744	15102	15276
$Ct_{is\_GHD_i}^{(Tmr<18)}$	10625	10531	6121	6030	101	83	6729	6638
$Ct_{is\_GHD_i}^{(Tmr>25)}$	18	20	787	805	2001	2054	706	723
$Ct_{is\_GHD_v}^{(Tmr>25)}$	7342	7430	17083	17224	12395	12513	17548	17699
$Ct_{is\_NHD_i}^{( Ta-Ts >5)}$	0	0	5	5	105	113	17	18
$Ct_{is\_NHD_v}^{( Ta-Ts >5)}$	2	4	95	106	72	78	216	224
$Ct_{is\_NHD_i}^{( Ta-Ts >10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$Ct_{is\_NHD_v}^{( Ta-Ts >10)}$	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]



Quadro 5.6. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Caixilho em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte		Este		Sul		Oeste	
	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT	Al sCT	Al cCT
Ctic_Nic <sup>(Ta≥18)</sup>	19,07	18,76	12,33	12,07	1,74	1,60	13,28	13,02
Ctic_Nvc <sup>(Ta≤25)</sup>	11,35	11,43	25,77	25,92	19,15	19,27	26,65	26,80
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	3	3	207	213	741	766	171	177
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	1715	1713	739	737	2	1	885	882
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	0	312	319	1236	1271	253	260
Ctic_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	1991	2006	4361	4367	3315	3329	4467	4473
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	281	281	185	185	126	131	221	219
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	9	9	87	87	142	142	334	334
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Nic e Nvc [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

### 5.3.5. TIPO DE VIDRO

Na figura 5.15 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro, respetivamente, Vidro Duplo (Vd) e Vidro Simples (Vs), para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr e Necessidade nominal de energia útil para aquecimento e arrefecimento Ctic\_Nic\_Nvc, representadas a verde. Nas figuras 5.16 e 5.18 é apresentada a análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro, em função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço						Caraterísticas do Vão Envidraçado				Caraterísticas do Vão Envidraçado			
Localização						Orientação				Orientação			
Bragança Évora Porto						Norte Este Sul Oeste				Norte Este Sul Oeste			
Espaço						Sombreamento por Elementos Exteriores				Sombreamento por Elementos Exteriores			
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2						Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento				Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento			
Profundidade						Relação Aenv/Apav				Relação Aenv/Apav			
Prof1 Prof2 Prof3						10% 15% 30%				10% 15% 30%			
Inércia Térmica						Dispositivos de Proteção Solar				Dispositivos de Proteção Solar			
Forte Fraca						Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção				Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção			
Cor Fachada						Tipo de Caixilho				Tipo de Caixilho			
Clara Escura						Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico				Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico			
Espessura do Isolamento						Tipo de Vidro				Tipo de Vidro			
I_3/6 cm I_6/12 cm						Vidro Duplo Vidro Simples				Vidro Duplo Vidro Simples			
Ventilação						Caraterísticas do Vidro				Caraterísticas do Vidro			
Ra1 Ra2						Incolor Verde LoE				Incolor Verde LoE			

Fig.5.15 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.16 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.17 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste

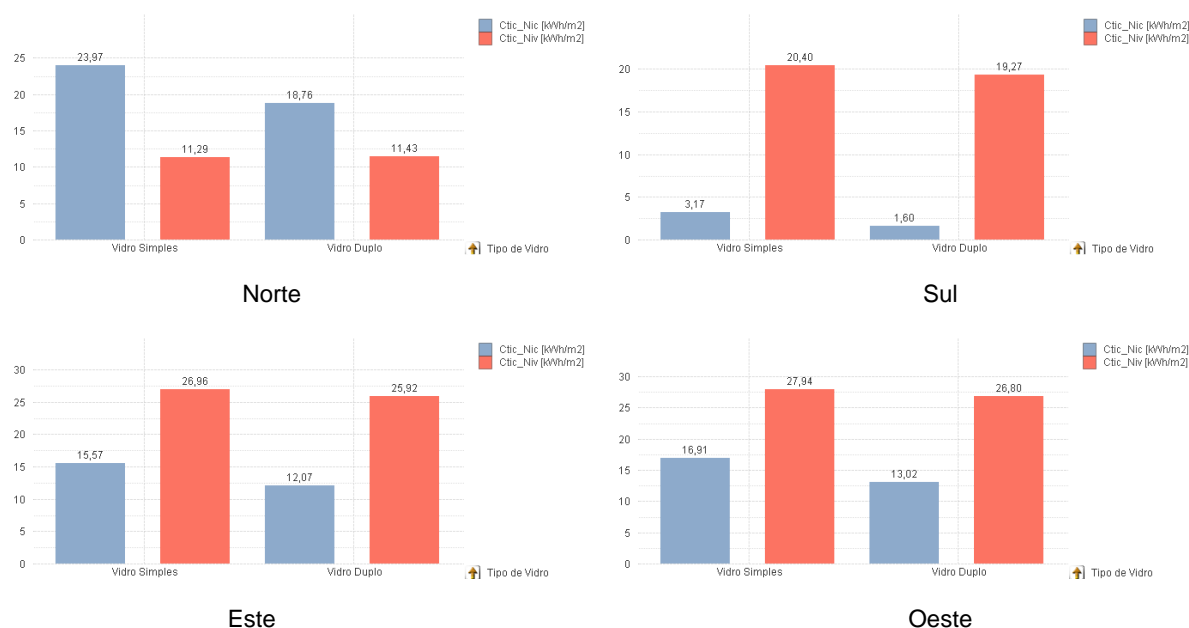


Fig.5.18 – Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro para as funções Ctic\_Nic e Ctic\_Niv em função da orientação dos vãos envidraçados

Ao observar as figuras 5.16 e 5.17 podemos concluir que na estação de aquecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr<18)}$  são melhores quando se considera o vidro duplo, os valores mais baixos e com maior variação foram obtidos quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, relação às outras orientações. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ). Já os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr>25)}$ , são melhores quando se considera o vidro simples para todas as orientações, sendo que a maior diferença se verifica quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte.

Na estação de arrefecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Tmr>25)}$  são ligeiramente melhores quando se considera o vidro simples, com uma variação semelhante para todas as orientações, sendo menor a Sul. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ).

Ao observar a figura 5.18 podemos concluir que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta\leq 18)}$  e  $Ctic\_N_{iv}^{(Ta\leq 25)}$  têm um desenvolvimento muito similar às funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Tmr>25)}$ . Durante a estação de aquecimento os vãos envidraçados com vidro duplo têm melhor desempenho, necessidade de energia menor para aquecimento. Durante a estação de arrefecimento verifica-se o contrário, os vãos envidraçados com vidro simples apresentam resultados ligeiramente mais baixos para todas as orientações, menor necessidade nominal de energia útil para arrefecimento.

Nos quadros 5.7 e 5.8 é apresentada a análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro, respetivamente, Vidro Duplo (Vd) e Vidro Simples (Vs), para todas as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, em função da orientação do vão envidraçado, sem e com climatização.

Quadro 5.7. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação Função	Norte		Este		Sul		Oeste	
	Vd	Vs	Vd	Vs	Vd	Vs	Vd	Vs
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	11126	12623	6950	8186	494	1090	7509	8659
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	38	14	580	434	1370	1124	522	383
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	6383	5580	14855	13888	10744	10242	15276	14262
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	10531	12051	6030	7253	83	383	6638	7753
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	20	2	805	616	2054	1676	723	551
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	7430	6545	17224	16276	12513	12034	17699	16722
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	0	599	5	1141	113	2390	18	1191
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	4	955	106	1418	78	1293	224	586
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	4	0	17	0	4
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	3	0	19	0	17	0	59

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]

Quadro 5.8. - Análise paramétrica da influência do Tipo de Vidro em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte		Este		Sul		Oeste	
	Vd	Vs	Vd	Vs	Vd	Vs	Vd	Vs
Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	18,76	23,97	12,07	15,57	1,60	3,17	13,02	16,91
Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	11,43	11,29	25,92	26,96	19,27	20,40	26,80	27,94
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	3	1	213	174	766	672	177	146
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	1713	2316	737	1109	1	29	882	1322
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	0	319	263	1271	1088	260	210
Ctic_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	2006	1878	4367	4468	3329	3407	4473	3407
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	281	2172	185	2186	131	2544	219	2282
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	9	604	87	663	142	695	334	839
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	36	0	32	0	30	0	33
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	1	0	0

Nota: N<sub>ic</sub> e N<sub>vc</sub> [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

## 5.3.6. CARATERÍSTICAS DO VIDRO

Na figura 5.19 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência das Caraterísticas do Vidro, respetivamente, Incolor (Inc), colorido (Verde) e LoE, para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD\_Tmr, representadas a verde. Nas figuras 5.20 a 5.22 é apresentada a análise paramétrica da influência das Caraterísticas do Vidro, em função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço	Caraterísticas do Vão Envidraçado	Caraterísticas do Vão Envidraçado
<b>Localização</b>	<b>Orientação</b>	<b>Orientação</b>
Bragança Évora Porto	Norte Este Sul Oeste	Norte Este Sul Oeste
<b>Espaço</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>	<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento	Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento
<b>Profundidade</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>	<b>Relação Aenv/Apav</b>
Prof1 Prof2 Prof3	10% 15% 30%	10% 15% 30%
<b>Inércia Térmica</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>	<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>
Forte Fraca	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção	Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção
<b>Cor Fachada</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>	<b>Tipo de Caixilho</b>
Clara Escura	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico	Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico
<b>Espessura do Isolamento</b>	<b>Tipo de Vidro</b>	<b>Tipo de Vidro</b>
I_3/6 cm I_6/12 cm	Vidro Duplo Vidro Simples	Vidro Duplo Vidro Simples
<b>Ventilação</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>	<b>Caraterísticas do Vidro</b>
Ra1 Ra2	Incolor Verde LoE	Incolor Verde LoE

Fig.5.19 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência das Caraterísticas do Vidro, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul

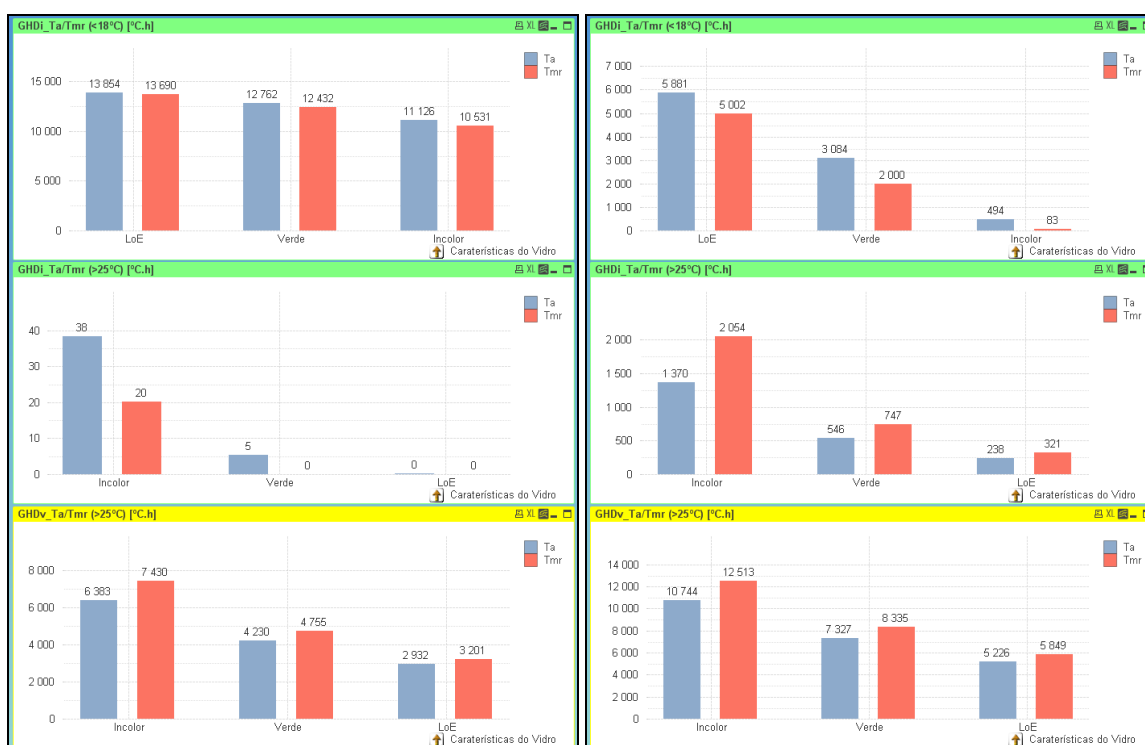


Fig.5.20 – Análise paramétrica da influência das Caraterísticas do Vidro para as funções Ctis\_GHD\_Ta e Ctis\_GHD\_Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.21 – Análise paramétrica da influência das Características do Vidro para as funções  $Cti_{GHD-Ta}$  e  $Cti_{GHD-Tmr}$ : à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste

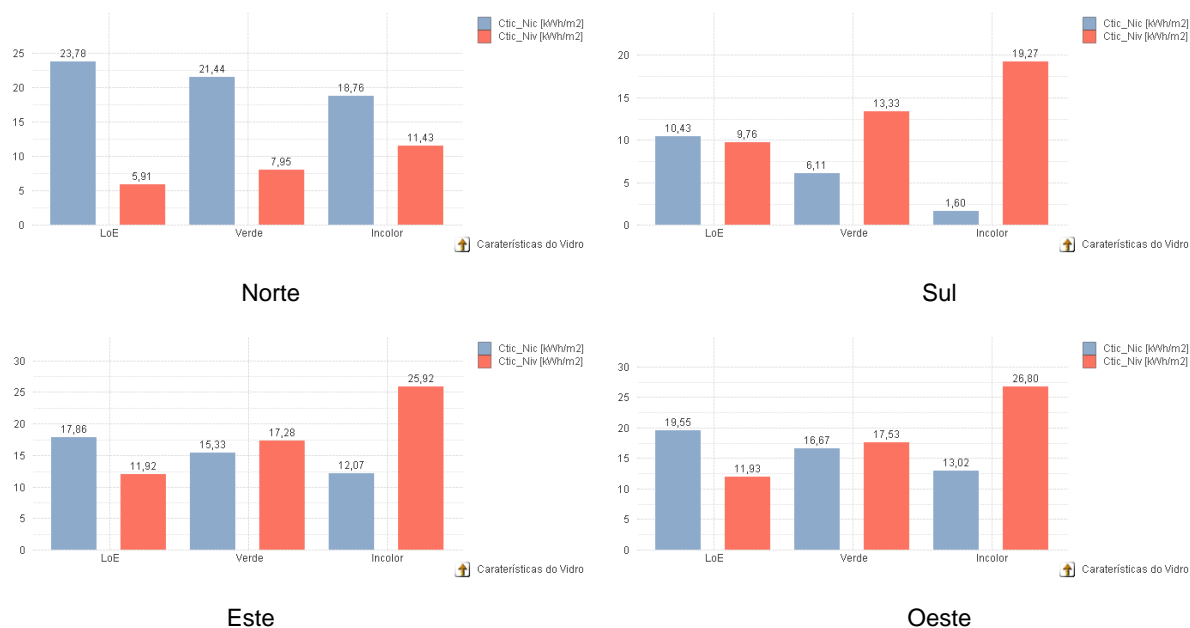


Fig.5.22 – Análise paramétrica da influência das Características do Vidro para as funções  $Cti_{Nic}$  e  $Cti_{Nvc}$  em função da orientação dos vãos envidraçados

Nos quadros 5.9 e 5.10 é apresentada a análise paramétrica da influência em relação às Características do Vidro, respetivamente, Incolor (Inc), colorido (Verde) e LoE, relacionadas com o conforto térmico interior, respetivamente, sem e com climatização.

Quadro 5.9. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	11126	12762	13854	6950	9001	10563	494	3084	5881	7509	9777	11547
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	38	5	0	580	231	72	1370	546	238	522	185	60
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	6383	4230	2932	14855	9794	6653	10744	7327	5226	15276	9863	6549
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	10531	12432	13690	6030	8300	10014	83	2000	5002	6638	9145	11117
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	20	0	0	805	337	79	2054	747	321	723	251	32
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	7430	4755	3201	17224	11367	7531	12513	8335	5849	17699	11399	7355
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	0	0	0	5	160	211	113	715	837	18	286	361
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	4	7	12	106	352	401	78	356	430	124	485	531
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	2	18	0	182	352	0	28	71
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	23	103	0	11	31	0	115	214

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]

Quadro 5.10. - Análise paramétrica da influência das Características do Vidro em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE	Inc	Verde	LoE
Ctic_Nic <sup>(Ta≥18)</sup>	18,76	21,44	23,78	12,07	15,33	17,86	1,60	6,11	10,43	13,02	16,67	19,55
Ctic_Nvc <sup>(Ta≤25)</sup>	11,43	7,95	5,91	25,92	17,28	11,92	19,27	13,33	9,76	26,80	17,53	11,93
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	3	0	0	213	57	8	766	234	87	177	55	11
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	1713	2158	2568	737	1291	1672	1	162	610	882	1485	1911
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	0	0	319	70	0	1271	328	87	260	31	0
Ctic_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	2006	1158	689	4367	2981	1920	3329	2145	1447	4473	2943	1797
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	281	281	304	185	326	375	131	787	954	219	476	550
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	9	91	95	87	494	528	142	489	531	334	582	614
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	1	15	0	166	330	0	25	60
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	89	163	0	61	85	0	247	302

Nota: Nic e Nvc [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

Ao observar as figuras 5.20 e 5.21 podemos concluir que na estação de aquecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta<18)</sup> e Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr<18)</sup>, em relação às características dos vidros, são melhores quando se considera o vidro Incolor e piores quando se considera o vidro com baixa emissividade, LoE, a menor variação verifica-se quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte, orientação com menos ganhos solares. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ) são ligeiramente superiores aos relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ). Já os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta>25)</sup> e Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Tmr>25)</sup>, são melhores quando se considera o vidro com baixa emissividade, LoE, e piores quando se considera o vidro Incolor, uma vez que o vidro com baixa emissividade tem um fator solar mais baixo, reduzindo em muito os ganhos solares.

Na estação de arrefecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho Ctis\_GHD<sub>v</sub><sup>(Ta>25)</sup> e Ctis\_GHD<sub>v</sub><sup>(Tmr>25)</sup>, como seria de esperar, são melhores quando se considera o vidro com baixa emissividade, LoE, pela razões apontadas em cima, com uma variação semelhante para todas

as orientações. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ).

Ao observar a figura 5.22 podemos concluir que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  e  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$  têm um desenvolvimento muito similar às funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta < 18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta > 25)}$ . Durante a estação de aquecimento os vãos envidraçados com vidro Incolor têm melhor desempenho, necessidade de energia menor para aquecimento. Durante a estação de arrefecimento verifica-se o contrário, os vãos envidraçados vidro com baixa emissividade, LoE, apresentam resultados mais baixos para todas as orientações, menor necessidade nominal de energia útil para arrefecimento.

### 5.3.7. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO SOLAR

Na figura 5.23 são indicadas as opções selecionadas relativas à análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar, respetivamente, Proteção Exterior (PSe), Proteção Interior (PSi) e Sem Proteção (sPS), para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD\_Ta$  e  $Ctis\_GHD\_Tmr$ , representadas a verde. Nas figuras 5.24 a 5.26 é apresentada a análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar, em função da orientação do vão envidraçado.

Caraterísticas do Espaço							Caraterísticas do Vão Envidraçado				Caraterísticas do Vão Envidraçado			
Localização							Orientação				Orientação			
Bragança Évora Porto							Norte Este Sul Oeste				Norte Este Sul Oeste			
Espaço							Sombreamento por Elementos Exteriores				Sombreamento por Elementos Exteriores			
A.0 A.1 A.2 B.0 B.1 B.2							Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento				Elemento Horizontal Elementos Verticais Sem Sombreamento			
Profundidade							Relação Aenv/ Apav				Relação Aenv/ Apav			
Prof1 Prof2 Prof3							10% 15% 30%				10% 15% 30%			
Inércia Térmica							Dispositivos de Proteção Solar				Dispositivos de Proteção Solar			
Forte Fraca							Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção				Proteção Exterior Proteção Interior Sem Proteção			
Cor Fachada							Tipo de Caixilho				Tipo de Caixilho			
Clara Escura							Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico				Al sem Corte Térmico Al com Corte Térmico			
Espessura do Isolamento							Tipo de Vidro				Tipo de Vidro			
I_3/6 cm I_6/12 cm							Vidro Duplo Vidro Simples				Vidro Duplo Vidro Simples			
Ventilação							Caraterísticas do Vidro				Caraterísticas do Vidro			
Ra1 Ra2							Incolor Verde LoE				Incolor Verde LoE			

Fig.5.23 – Opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e às caraterísticas do vão envidraçado para a análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar, por exemplo, à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul





Fig.5.24 – Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Norte e à direita a Sul



Fig.5.25 – Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctis\_GHD-Ta e Ctis\_GHD-Tmr: à esquerda para os vãos envidraçados orientados a Este e à direita a Oeste

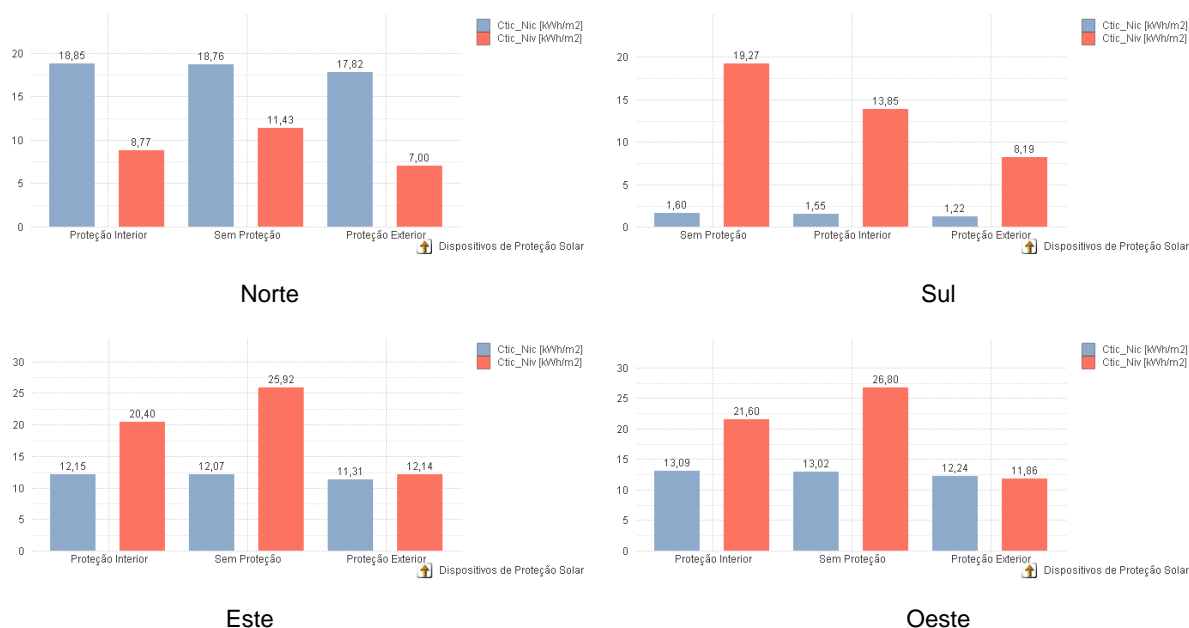


Fig.5.26 – Análise paramétrica da influência aos Dispositivos de Proteção Solar para as funções Ctic\_Nic e Ctic\_Nvc em função da orientação dos vãos envidraçados

Ao observar as figuras 5.24 e 5.25 podemos concluir que na estação de aquecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$ ,  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr<18)}$ ,  $Ctis\_GHD_i^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Tmr>25)}$ , em relação aos Dispositivos de Proteção Solar, são melhores quando se considera a proteção solar pelo exterior e piores quando não se considera a proteção solar, e a utilização da proteção solar pelo interior também apresenta um bom desempenho, uma vez que os dispositivos de proteção só estão ativos durante a noite, permitindo os ganhos solares durante as horas de dia e reduzir as perdas de calor durante as horas da noite, as menores variações verificam-se quando os vãos envidraçados estão orientados a Norte e as maiores variações verificam-se quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, principalmente em relação à temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ).

Na estação de arrefecimento os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Tmr>25)}$ , apresentam a mesma tendência, são melhores quando se considera a proteção solar pelo exterior e piores quando não se considera a proteção solar, com uma variação semelhante para todas as orientações. De referir que os valores da função de avaliação do desempenho relacionados com a temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) são superiores aos relacionados com a temperatura do ar ( $T_a$ ).

Ao observar a figura 5.26 podemos concluir que os resultados obtidos para as funções de avaliação do desempenho  $Ctic\_Nic^{(Ta\geq 18)}$  e  $Ctic\_Nvc^{(Ta\leq 25)}$  têm um desenvolvimento um pouco diferente durante a estação de aquecimento, embora essa diferença não seja muito significativa, das funções de avaliação do desempenho  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ , uma vez que só para os vãos envidraçados orientados a Sul é que o pior desempenho se verifica quando não se considera a proteção solar, para as restantes orientações o pior desempenho se verifica quando se considera a proteção solar pelo interior. Já durante a estação de arrefecimento verifica-se um desenvolvimento muito similar às funções anteriores, os vãos envidraçados com proteção solar pelo exterior apresentam melhor desempenho e e sem proteção solar apresentam o pior desempenho, para todas as orientações.

Nos quadros 5.11 e 5.12 é apresentada a análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar, respetivamente, Proteção Exterior (PSe), Proteção Interior (PSi) e Sem Proteção (sPS),

para todas as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico interior, em função da orientação do vão envidraçado, sem e com climatização.

Quadro 5.11. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar em função da orientação do vão envidraçado, sem climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	10675	11041	11126	6547	6865	6950	348	456	494	7101	7426	7509
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	7	17	38	266	444	580	760	1182	1370	169	376	522
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	3748	4705	6383	6948	11605	14855	4468	7531	10744	6756	12235	15276
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	10054	10191	10531	5614	5723	6030	32	40	83	6219	6333	6638
Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	4	20	393	664	805	1288	1921	2054	249	567	723
Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	4193	5377	7430	8024	13565	17224	5052	8577	12513	7775	14233	17699
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	0	0	0	0	0	5	12	12	113	11	12	18
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	0	0	4	0	0	106	0	6	78	8	7	124
Ctis_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ctis_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: GHD [°C.h], NHD [h]

Quadro 5.12. - Análise paramétrica da influência dos Dispositivos de Proteção Solar em função da orientação do vão envidraçado, com climatização

Orientação Função	Norte			Este			Sul			Oeste		
	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs	PSe	Psi	sPs
Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	17,82	18,85	18,76	11,31	12,15	12,07	1,22	1,55	1,60	12,24	13,09	13,02
Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	7,00	8,77	11,43	12,14	20,40	25,92	8,19	13,85	19,27	11,86	21,60	26,80
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	0	1	3	120	169	213	559	705	766	78	131	177
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&lt;18)</sup>	1597	1378	1713	638	464	737	0	0	1	778	598	882
Ctic_GHD <sub>i</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	0	0	0	191	279	319	1018	1274	1271	97	206	260
Ctic_GHD <sub>v</sub> <sup>(Tmr&gt;25)</sup>	989	1270	2006	2116	3401	4367	1278	2088	3329	2010	3526	4473
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	84	50	281	42	25	185	23	50	131	70	47	219
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;5)</sup>	2	1	9	6	17	87	17	44	142	102	178	334
Ctic_NHD <sub>i</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ctic_NHD <sub>v</sub> <sup>( Ta-Ts &gt;10)</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: N<sub>ic</sub> e N<sub>vc</sub> [kWh/ano.m<sup>2</sup>], GHD [°C.h], NHD [h]

### 5.3.8. SÍNTESE DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para analisar a importância relativa de cada uma das características dos vãos envidraçados anteriormente analisadas, para as funções de avaliação do desempenho Graus-hora de desconforto devido à temperatura do ar interior (Ctis\_GHD<sub>i</sub><sup>(Ta<18)</sup> e Ctis\_GHD<sub>v</sub><sup>(Ta>25)</sup>) e para as funções de avaliação do desempenho Necessidade nominal de energia útil (Ctic\_N<sub>ic</sub><sup>(Ta≥18)</sup> e Ctic\_N<sub>vc</sub><sup>(Ta≤25)</sup>), foi determinada a diferença (*D*), em percentagem, entre os resultados obtidos com o melhor e pior desempenho fazendo variar a característica do vão envidraçado (*j*), para cada orientação, equação 5.4, apresentados nos quadros 5.13 e 5.14, respetivamente, sem e com climatização. Posteriormente, para a determinação da importância por estação (aquecimento e arrefecimento) e anual para cada característica dos vãos envidraçados utilizou-se a média das diferenças obtidas para cada orientação.

$$D_j = \frac{A_j - B_j}{A_j} \times 100 [\%] \quad (5.4)$$

onde:

- $A_j$  Resultado obtido para a opção com melhor desempenho;  
 $B_j$  Resultado obtido para a opção com pior desempenho;  
 $j$  Características dos vãos envidraçados.

Nos quadros para identificar as características dos vãos envidraçados foi utilizada a seguinte simbologia:

- Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae);
- Sombreamento por Elementos Exteriores (SE);
- Tipo de caixilho (Cx);
- Tipo de vidro (V);
- Características do Vidro (Cv);
- Dispositivos de Proteção Solar (Ps).

Quadro 5.13. - Análise de importância das características dos vãos envidraçados, sem climatização

Caraterísticas	Orientação Função	Norte	Este	Sul	Oeste	Geral <sup>(1)</sup>		Ordem de Importância	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
Ae	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	21,60	52,34	100	54,76	57,17	59,65	1	1
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	58,51	63,27	62,24	64,51	62,13		1	
SE	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	6,86	18,95	84,50	20,44	32,69	34,45	3	3
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	16,34	38,58	48,66	41,25	36,21		4	
Cx	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	1,01	1,55	9,85	1,46	3,47	2,35	6	6
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	1,47	1,09	1,20	1,14	1,23		6	
V	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	11,86	15,10	54,68	13,28	23,73	15,66	4	5
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	12,58	6,51	4,67	6,34	7,60		5	
Cv	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	19,69	34,20	91,60	34,97	45,12	49,78	2	2
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	54,07	55,21	51,36	57,13	54,44		2	
Ps	Ctis_GHD <sub>i</sub> <sup>(Ta&lt;18)</sup>	4,05	5,80	29,55	5,43	11,21	31,69	5	4
	Ctis_GHD <sub>v</sub> <sup>(Ta&gt;25)</sup>	41,28	53,23	58,41	55,77	52,17		3	

(1) Valor médio das diferenças, por estação (i – aquecimento, v – arrefecimento) e anual.

Quadro 5.14. - Análise de importância das características dos vãos envidraçados, com climatização

Caraterísticas	Orientação Função	Norte	Este	Sul	Oeste	Geral <sup>(1)</sup>	Ordem de Importância		
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
Ae	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	6,33	38,32	100	40,91	46,91	57,23	1	1
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	63,76	69,62	68,50	70,40	68,07		1	
SE	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	6,66	17,44	74,03	18,88	29,25	32,32	3	3
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	15,05	37,92	48,05	40,56	35,40		4	
Cx	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	1,63	2,11	8,05	1,96	3,43	2,02	6	6
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	0,70	0,60	0,62	0,56	0,62		6	
V	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	21,74	22,48	49,53	23,00	29,19	16,43	4	5
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	1,22	3,86	5,54	4,08	3,68		5	
Cv	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	21,11	32,42	84,66	33,40	42,90	47,34	2	2
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	48,29	54,01	49,35	55,48	51,79		2	
Ps	Ctic_N <sub>ic</sub> <sup>(Ta≥18)</sup>	5,01	6,30	23,75	5,99	10,26	30,78	5	4
	Ctic_N <sub>vc</sub> <sup>(Ta≤25)</sup>	38,76	53,16	57,50	55,75	51,29		3	

(1) Valor médio das diferenças por estação (i – aquecimento, v – arrefecimento) e anual.

No geral, podemos observar que a ordem de importância das características relacionadas com os vãos envidraçados, em função da sua orientação, é igual, como seria de esperar, para as duas situações, sem e com climatização:

- 1 - Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ );
- 2 - Características do Vidro;
- 3 - Sombreamento por Elementos Exteriores;
- 4 - Dispositivos de Proteção Solar;
- 5 - Tipo de Vidro;
- 6 - Tipo de Caixilho.

Podemos também observar que as maiores variações ocorrem quando os vãos envidraçados estão orientados a Sul, com exceção das características relacionadas com Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) e Características do Vidro que ocorrem a Oeste seguidas de Este e da características relacionadas com Tipo de Vidro que ocorre a Norte, durante a estação de arrefecimento.

## 5.4. MODELO DE SELEÇÃO

### 5.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como já foi anteriormente referido, um dos objetivos fulcrais deste trabalho de investigação é propor um modelo de seleção (simplificado) das características relacionadas com os vãos envidraçados, através da análise dos resultados obtidos para funções de avaliação do desempenho, de modo, a obter-se a solução ótima, solução que minimize essas funções de avaliação do desempenho, recorrendo-se a gráficos apresentados no programa QlikView [141] para esse efeito através da seleção das opções com o melhor desempenho numa sequência de variáveis ou por escolha do decisor. Este processo será validado com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS [142].

Na realidade vão ser propostos dois modelos de seleção, um para cada tipo de controlo da temperatura interior, sem climatização e com climatização. Das funções de avaliação do desempenho estudadas para cada modelo de seleção foram escolhidas as seguintes:

- Para a situação de controlo da temperatura interior - sem climatização, obter a solução ótima, que minimize às funções de avaliação do desempenho,  $Ctis\_GHD_i^{(Ta < 18)}$  e  $Ctis\_GHD_i^{(Ta > 25)}$  (Graus-hora de desconforto em que  $Ta < 18^\circ C$  e  $Ta > 25^\circ C$  – sobreaquecimento), esta última por opção do decisor, e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta > 25)}$  (Graus-hora de desconforto em que  $Ta > 25^\circ C$ ) descritas no ponto §4.4.4. Os resultados obtidos nas outras funções de avaliação do desempenho também são apresentados para consulta;
- Para a situação de controlo da temperatura interior - com climatização, obter a solução ótima, que minimize as duas funções de avaliação do desempenho  $Ctic\_N_{ic}^{(Ta \geq 18)}$  (Necessidade nominal de energia útil para aquecimento de modo a garantir que  $Ta \geq 18^\circ C$ ) e  $Ctic\_N_{vc}^{(Ta \leq 25)}$  (Necessidade nominal de energia útil para arrefecimento de modo a garantir que  $Ta \leq 25^\circ C$ ) descritas no ponto §4.4.4. Os resultados obtidos nas outras funções de avaliação do desempenho também são apresentados para consulta.

Num problema de otimização com apenas uma função objetivo pretende-se minimizar ou maximizar essa função objetivo.

Essa análise pode ser efetuada por estação (aquecimento e ou arrefecimento) ou pode ser anual, em que cada uma das funções de avaliação do desempenho é afetada com uma certa ponderação (P), em relação à importância de cada uma das estações, que reflete a sua importância para o decisor, permitindo que sejam agregadas numa única função a otimizar.

Assim, o processo fica muito simplificado em termos matemáticos e computacionais obtendo-se uma única solução ótima para o problema. Neste caso as duas funções de avaliação do desempenho a otimizar, para os dois modelos de seleção, respetivamente, Graus-hora de desconforto (GHD) e Necessidade nominal de energia útil ( $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ ), representam as mesmas ordens de grandeza não sendo necessário recorrer-se a uma normalização das funções objetivo.

A ponderação escolhida para cada objetivo vai refletir a importância dada pelo decisor a esse objetivo no contexto global do problema, introduzindo deste modo alguma subjetividade no processo de otimização.

#### 5.4.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA UTILIZADA

##### 5.4.2.1. Controlo da Temperatura Interior: Sem Climatização

Para a situação em que não se faz o controlo da temperatura interior (sem climatização) para efetuar uma análise anual que permita verificar qual a melhor solução, de forma, a considerar em simultâneo a estação de aquecimento (i) e de arrefecimento (v), mas com ponderação diferente, foi considerado um fator de ponderação (P). Foi também considerada a opção de se considerar o efeito do sobreaquecimento (Si) durante a estação de aquecimento. Através da aplicação das seguintes expressões, em °C.h:

- No programa QlikView:

$$\text{Média} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \left( \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta < 18)} + \text{Si} \times \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta > 25)} \right) \times P + \text{Ctis\_GHD}_v^{(Ta > 25)} \times (1 - P) \right) \right] \quad (5.5.)$$

$$\text{Máximo} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \left( \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta < 18)} + \text{Si} \times \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta > 25)} \right) \times P + \text{Ctis\_GHD}_v^{(Ta > 25)} \times (1 - P) \right) \right] \quad (5.6.)$$

$$\text{Mínimo} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \left( \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta < 18)} + \text{Si} \times \text{Ctis\_GHD}_i^{(Ta > 25)} \right) \times P + \text{Ctis\_GHD}_v^{(Ta > 25)} \times (1 - P) \right) \right] \quad (5.7.)$$

em que,

Ctis Controlo da temperatura interior - Sem climatização;

$T_a$  Temperatura do ar;

GHD Graus-hora de desconforto;

i e v Estação de aquecimento e estação de arrefecimento, respetivamente;

Si Efeito do sobreaquecimento durante a estação de aquecimento (1 – Sim, 0 – Não);

P Ponderação (0 a 1).

A ponderação utilizada neste procedimento toma valores entre 0 e 1, quando a ponderação é igual a 1 o utilizador está apenas a considerar a função de avaliação do desempenho relativa à estação de

aquecimento (i) e quando a ponderação é igual a 0 o utilizador está apenas a considerar a função de avaliação do desempenho relativa à estação de arrefecimento (v).

- No programa Cplex da coleção GAMS:

Nesta situação,  $C_k^{trans}$  assume em (5.3) a seguinte expressão:

$$C_k^{trans} = C_k^i \times Si \times P + C_k^v \times (1 - P) \quad (5.8)$$

onde:

$C_k^i$  Parâmetro original para a combinação  $k$  na estação de aquecimento (i);

$C_k^v$  Parâmetro original para a combinação  $k$  na estação de arrefecimento (v);

Si Parâmetro que assume o valor 1 ou 0, caso se pretenda ou não considerar o efeito do sobreaquecimento durante a estação de aquecimento;

P Ponderação,  $0 \leq P \leq 1$ .

#### 5.4.2.2. Controlo da Temperatura Interior: Com Climatização

Para a situação em que se faz o controlo da temperatura interior (com climatização) para efetuar uma análise anual que permita verificar qual a melhor solução, de forma, a considerar em simultâneo a estação de aquecimento (i) e de arrefecimento (v), recorreu-se à expressão das necessidades nominais anuais globais de energia primária,  $N_{ic}$ , proposta no REH [8] considerando apenas as Necessidades nominais de energia útil para climatização (aquecimento,  $N_{ic}$ , e arrefecimento,  $N_{vc}$ ).

Por defeito, para o sistema de aquecimento foi escolhido um sistema elétrico com eficiência nominal igual a 1 ( $\eta_i=1$ ) e para o sistema de arrefecimento foi escolhida uma bomba de calor com eficiência nominal igual a 3 ( $\eta_v=3$ ). Como estes equipamentos funcionam a eletricidade, os factores de conversão entre energia útil e energia primária para ambos os sistemas,  $F_{pu}$  tomam o mesmo valor igual a 2,5 kWh<sub>EP</sub>/kWh [8]. A qualquer momento o decisor tem possibilidade de alterar estes valores. Através da aplicação das seguintes expressões, em kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano:

- No programa QlikView:

$$\text{Média} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \frac{C_{tic} - N_{ic}^{(Ta \geq 18)}}{\eta_i} \times F_{pu,i} + \frac{C_{tic} - N_{vc}^{(Ta \leq 25)}}{\eta_v} \times F_{pu,v} \right) \right] \quad (5.9)$$

$$\text{Máximo} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \frac{C_{tic} - N_{ic}^{(Ta \geq 18)}}{\eta_i} \times F_{pu,i} + \frac{C_{tic} - N_{vc}^{(Ta \leq 25)}}{\eta_v} \times F_{pu,v} \right) \right] \quad (5.10.)$$

$$\text{Mínimo} \left[ \sum_{n=1}^{nc} \left( \frac{C_{tic} - N_{ic}^{(Ta \geq 18)}}{\eta_i} \times F_{pu,i} + \frac{C_{tic} - N_{vc}^{(Ta \leq 25)}}{\eta_v} \times F_{pu,v} \right) \right] \quad (5.11.)$$

em que:

Ctic Controlo da temperatura interior - Com climatização;

$T_a$	Temperatura do ar;
$N_{ic}$ e $N_{vc}$	Necessidade nominal de energia útil;
$i$ e $v$	Estação de aquecimento e estação de arrefecimento, respetivamente;
$\eta$	Eficiência nominal;
$F_{pu}$	Factor de conversão entre energia útil e energia primária.

- No programa Cplex da coleção GAMS:

Nesta situação,  $C_k^{trans}$  assume em (5.3) a seguinte expressão:

$$C_k^{trans} = \frac{C_k^i}{\eta_i} \times F_{pu,i} + \frac{C_k^v}{\eta_v} \times F_{pu,v} \quad (5.12.)$$

em que:

$C_k^i$	Parâmetro original para a combinação $k$ na estação de aquecimento ( $i$ );
$C_k^v$	Parâmetro original para a combinação $k$ na estação de arrefecimento ( $v$ ).

#### 5.4.3. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE SELEÇÃO

##### 5.4.3.1. Introdução

Como já foi referido anteriormente, para a apresentação dos modelos de seleção propostos foi criada uma interface gráfica no programa QlikView [141], que será validado com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS.

Como pretendemos obter o valor mínimo para as características relacionadas com o vão envidraçado, as características dos espaços já são previamente conhecidas, selecionadas de acordo com o projeto de arquitetura ou pelas preferências do decisor (as opções selecionadas são apresentadas a verde, na lista da esquerda das figuras 5.27 e 5.28). Como se pretende obter a solução ótima, valor mínimo, das opções relacionadas com as características dos vãos envidraçados, para que a seleção possa tornar num processo mais ou menos automático, definiu-se a seguinte sequência gráfica das características dos vãos envidraçados (é apresentado um gráfico relativo a essa característica), tendo em consideração a importância das variáveis em estudo de acordo com a análise paramétrica anteriormente realizada, em função da orientação dos vãos envidraçados (variável 7).

- 1 - Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ );
- 2 - Características do Vidro;
- 3 - Sombreamento por Elementos Exteriores;
- 4 - Dispositivos de Proteção Solar;
- 5 - Tipo de Vidro;
- 6 - Tipo de Caixilho;
- 7 - Orientação.



Para se passar para a variável seguinte o decisor apenas tem que clicar, no gráfico, na opção que tem o valor mínimo. E em qualquer momento o decisor pode voltar ao gráfico anterior ao clicar na seta que junto à indicação da variável, localizada no canto inferior direito. Ou o utilizador pode ir selecionar diretamente na lista da esquerda, onde estão as características relacionadas com o vão envidraçado, ou mesmo relacionadas com o espaço.

Se assim o entender, a qualquer momento o decisor pode seguir outro processo de seleção.

Nos gráficos será apresentado o valor máximo, mínimo e o valor médio em relação a todas as opções até se chegar à última característica do vão envidraçado, em que os valores apresentados para cada orientação serão todos iguais, valor da solução ótima. Esse resultado, solução ótima, será comparado com o resultado obtido pelo programa Cplex da coleção GAMS, para as mesmas condições, nomeadamente, tendo em consideração que todas as características dos espaços já são conhecidas à priori, sendo fixas ou em 0 ou em 1.

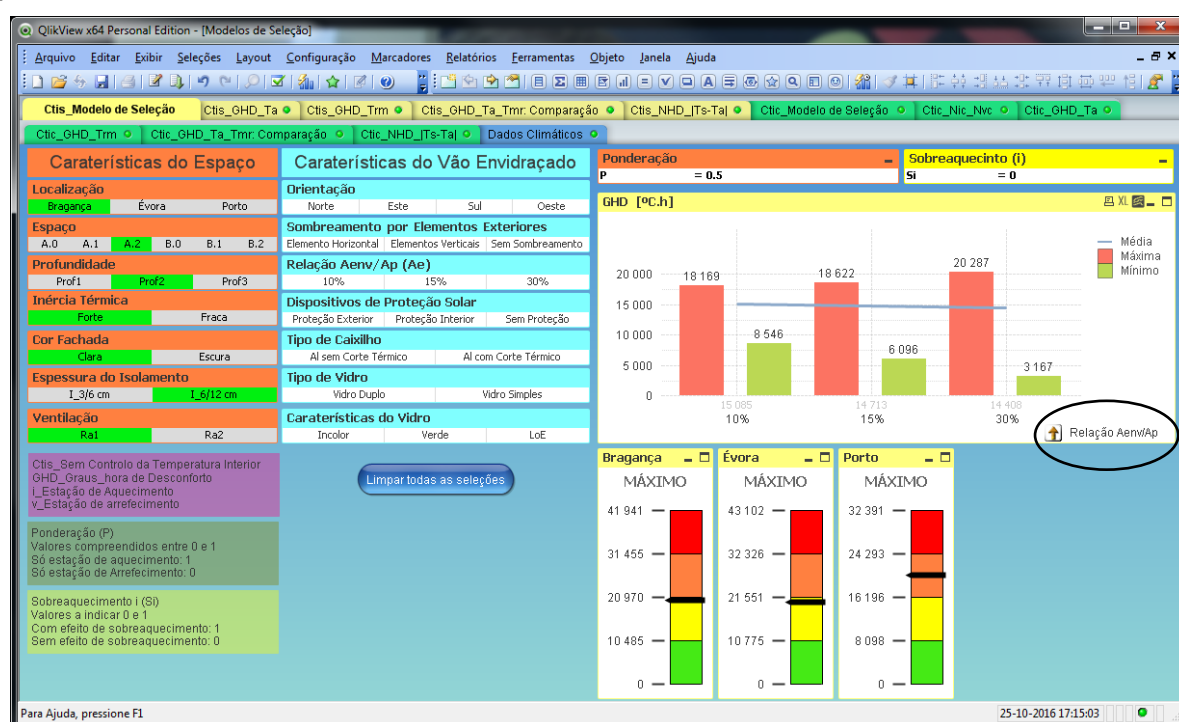


Fig.5.27 – Interface gráfica do Modelo de Seleção. Sem Climatização (Ctis\_Modelo de Seleção)



Fig.5.28 – Interface gráfica do Modelo de Seleção. Com Climatização (Ctic\_Modelo de Seleção)

Como as opções selecionadas relativas às caraterísticas dos espaços e dos vãos envidraçados são validas para todos os separadores, é possível para cada solução (combinação), consultar os dois Modelos de Seleção, e assim, verificar o grau de desconforto e as necessidades nominais de energia útil para climatização, e o desempenho das restantes funções de avaliação. Nos separadores dos Modelos de Seleção é ainda possível consultar, para cada localização geográfica, um gráfico com a indicação da relação entre o valor máximo das opções seleccionas (quando todas as variáveis estiverem seleccionadas será apresentado o resultado dessa solução) e o valor máximo tendo em consideração a todas as opções, logo a pior solução.

#### 5.4.3.2. Modelo de Seleção: Sem climatização (Ctis\_Modelo de Seleção)

Neste ponto será apresentada a aplicação do Modelo de Seleção, utilizando a interface gráfica criada no programa QlikView, para a situação em que não se faz controlo da temperatura interior, sem climatização, em que se pretende obter a melhor solução, valor mínimo, para as funções de avaliação do desempenho Graus-hora de desconforto  $Ctis\_GHD_i^{(Ta<18)}$ ,  $Ctis\_GHD_i^{(Ta>25)}$  e  $Ctis\_GHD_v^{(Ta>25)}$ , utilizando a sequência gráfica das caraterísticas dos vãos envidraçados anteriormente apresentada, tendo em consideração que todas as caraterísticas dos espaços já são conhecidas, figura 5.27.

Antes de dar início ao processo de seleção o decisor terá optar por consideram ou não o efeito do sobreaquecimento na estação de aquecimento (S: 1 – Sim, 0 – Não), se pretende efetuar uma análise anual ou por estação (aquecimento ou arrefecimento), para isso, terá que escolher um fator de ponderação (P) que pode tomar valores 0 e 1, em função das preferências (experiência) do decisor para uma análise anual, para a análise por estação, quando a ponderação é igual a 1 o decisor está apenas a considerar o desempenho relativa à estação de aquecimento (i) e quando a ponderação é igual a 0 está apenas a considerar o desempenho relativa à estação de arrefecimento (v). Para tal o decisor terá que

alterar os valores, por defeito, que estão indicados nas respetivas caixas. Para esta análise optou-se por considerar os valores que estão definidos por defeito,  $P = 0,5$  e  $S = 0$ , figura 5.27.

Para dar início ao processo de seleção o decisor (a sequência gráfica das características dos vãos envidraçados) terá de selecionar a opção representada no gráfico que apresenta o melhor desempenho, o valor mínimo mais baixo, que neste casos corresponde aos vãos envidraçados com uma Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) igual a 30%, ao clicar no gráfico, sobre 30% ou selecionando na caixa Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ), e o resultado é apresentado na figura 5.29.

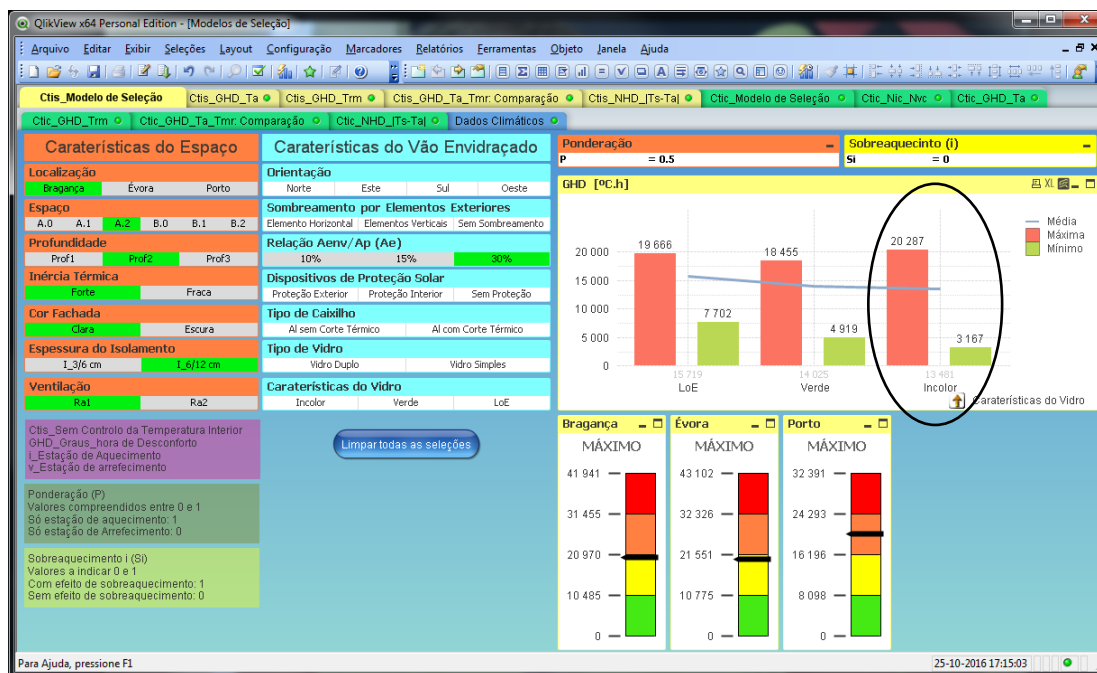


Fig.5.29 – Modelo de Seleção (Ctis\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ )

Na figura 5.29, podemos observar que a opção 30% da característica Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com vidro Incolor, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.30.

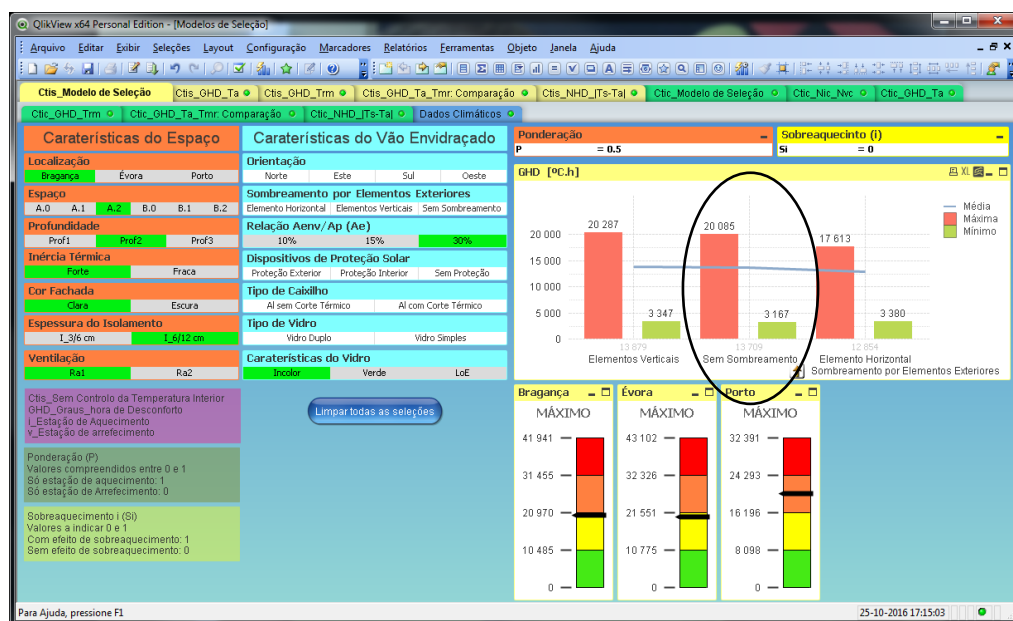


Fig.5.30 – Modelo de Seleção (Cti\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro

Na figura 5.30, podemos observar que a opção Incolor das Caraterísticas do Vidro está selecionada, e a que melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado Sem Sombreamento por Elementos Exteriores, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.31.

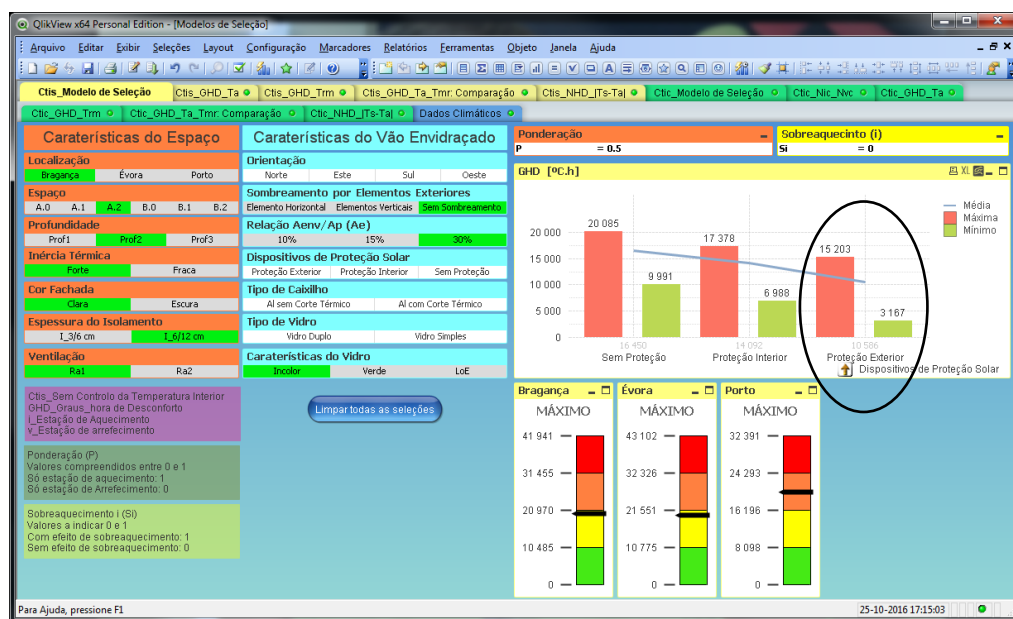


Fig.5.31 – Modelo de Seleção (Cti\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores

Na figura 5.31, podemos observar que a opção Sem Sombreamento da Caraterística Sombreamento por Elementos Exteriores está selecionada, e a que melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com Proteção Exterior, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.32.

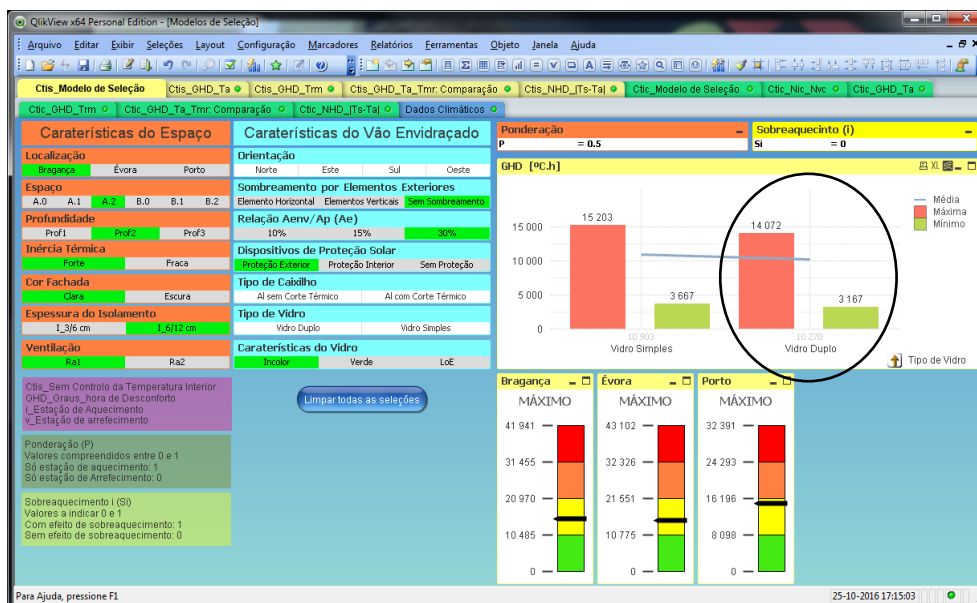


Fig.5.32 – Modelo de Seleção (Ctis\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar

Na figura 5.32, podemos observar que a opção Proteção Exterior da Característica Dispositivos de Proteção Solar está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com Vidro Duplo, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.33.

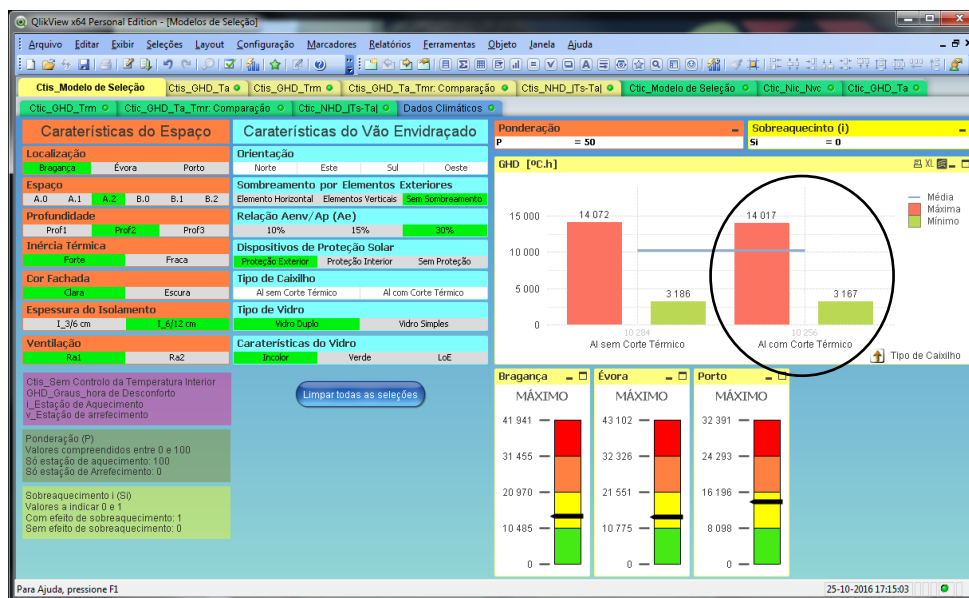


Fig.5.33 – Modelo de Seleção (Ctis\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às características do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Características do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro

Na figura 5.33, podemos observar que a opção Vidro Duplo da Característica Tipo de Vidro está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com

caixilharia em Alumínio (Al) com Corte Térmico, que o decisor terá de seleccionar para concluir o processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.34.

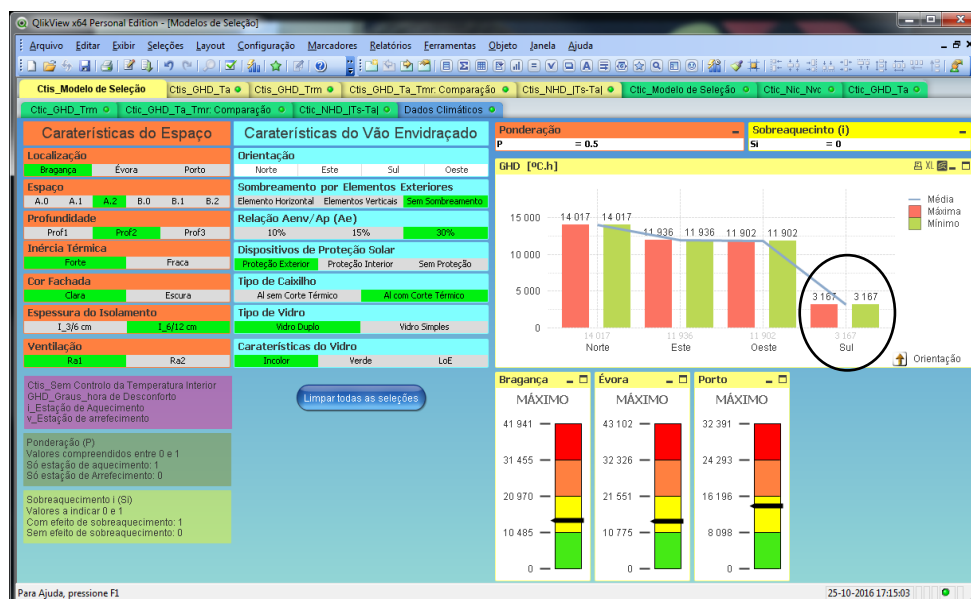


Fig.5.34 – Modelo de Seleção (Ctis\_Modelo de Seleção), com as opções seleccionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro, Tipo de Caixilho

Na figura 5.34, podemos observar que a opção Alumínio (Al) com Corte Térmico da Caraterística Tipo de Caixilho está seleccionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado orientado a Sul. Na figura 5.34 é também possível verificar o desempenho do vão envidraçado para as outras orientações, por exemplo, este espaço (A.2) com um vão com estas caraterísticas mas orientado a Norte, teria para os Graus-hora de desconforto anual (GHD) 14017 °C.h, 4,42 vezes mais em relação à orientação Sul.

O valor mínimo obtido para os Graus-hora de desconforto anual (GHD) para a ponderação de 50% e sem considerar o sobreaquecimento é de 3167 °C.h e que corresponde a um vão envidraçado com as seguintes caraterísticas, figura 5.35:

- Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae): 30%;
- Caraterísticas do Vidro: Incolor;
- Sombreamento por elementos exteriores: Sem Sombreamento;
- Dispositivos de Proteção Solar: Proteção Exterior;
- Tipo de Vidro: Vidro Duplo;
- Tipo de Caixilho: Al com Corte Térmico;
- Orientação: Sul.

Caraterísticas do Vão Envidraçado			
Orientação	Norte	Este	Sul
Sombreamento por Elementos Exteriores	Elemento Horizontal	Elementos Verticais	Sem Sombreamento
Relação $A_{env}/A_p$ (Ae)	10%	15%	30%
Dispositivos de Proteção Solar	Proteção Exterior	Proteção Interior	Sem Proteção
Tipo de Caixilho	Al sem Corte Térmico	Al com Corte Térmico	
Tipo de Vidro	Vidro Duplo	Vidro Simples	
Caraterísticas do Vidro	Incolor	Verde	LoE

Fig.5.35. – Ctis\_Modelo de Seleção: caraterísticas do vão envidraçado, com as opções seleccionadas

Na figura 5.36, é apresentado o resultado obtido para o valor mínimo para os Graus-hora de desconforto anual (GHD) para a ponderação de 50% e sem considerar o sobreaquecimento, pelo programa Cplex da coleção GAMS. O tempo de execução foi de 1,435 segundos.



Podemos observar que o resultado da função objetivo é o mesmo, 3166,6777 °C.h, e que corresponde à mesma solução ótima.

O programa Cplex da coleção GAMS permite, assim como o programa QlikView, resolver o problema quando nem as características do espaço nem as do vão envidraçado estão pré-definidas.

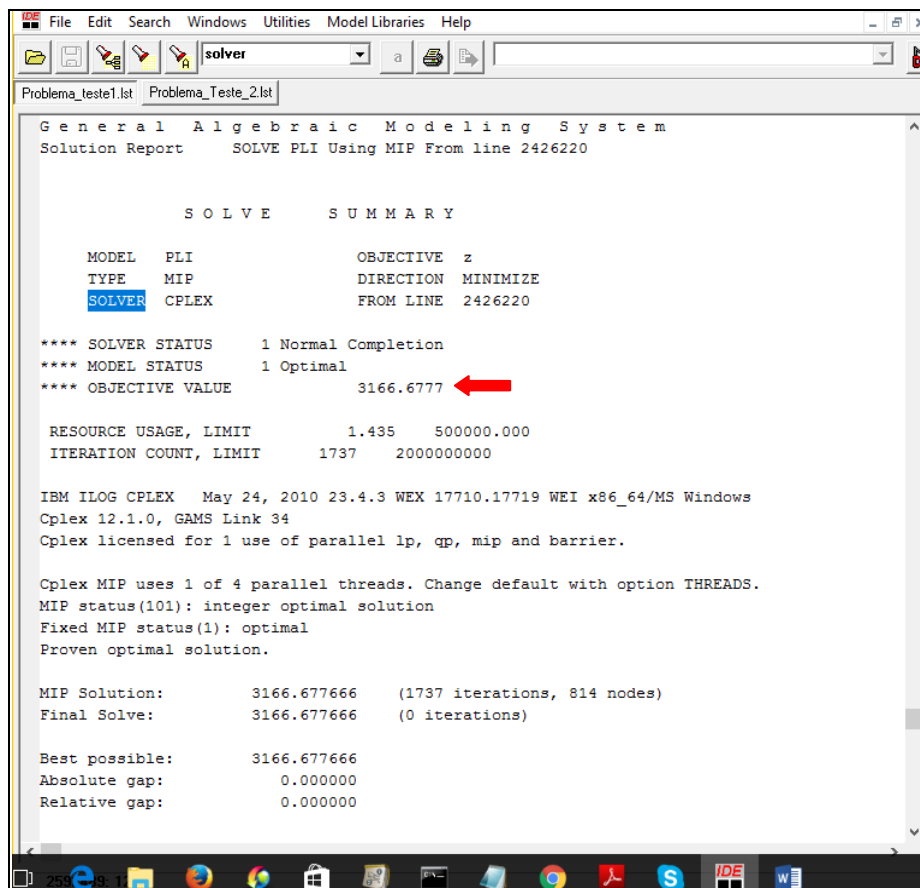


Fig.5.36. – Ctis: Resultado obtido com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS

#### 5.4.3.3. Modelo de Seleção: Com climatização (Ctic\_Modelo de Seleção)

Neste ponto será apresentada a aplicação do Modelo de Seleção, utilizando a interface gráfica criada no programa QlikView, para a situação em que se faz controlo da temperatura interior, com climatização, em que se pretende obter a melhor solução, valor mínimo, para a necessidade nominal anual global de energia primária,  $N_{ic}$ , utilizando a sequência gráfica das características dos vãos envidraçados anteriormente apresentada, tendo em consideração que todas as características dos espaços já são conhecidas, figura 5.28.

Antes de dar início ao processo de seleção o decisor terá que configurar as propriedades dos equipamentos de climatização, a eficiência nominal e o factor de conversão entre energia útil e energia primária, nas caixas respetivas. Por defeito, para o sistema de aquecimento foi escolhido um sistema elétrico com eficiência nominal igual a 1 ( $\eta_i=1$ ) e para o sistema de arrefecimento foi escolhida uma bomba de calor com eficiência nominal igual a 3 ( $\eta_r=3$ ). Como estes equipamentos funcionam a eletricidade, os factores de conversão entre energia útil e energia primária para ambos os sistemas,  $F_{pu}$  tomam o mesmo valor igual a 2,5 kWh<sub>EP</sub>/kWh, figura 5.28.

Para dar início ao processo de seleção o decisor (a sequência gráfica das características dos vãos envidraçados) terá de seleccionar a opção representada no gráfico que apresenta o melhor desempenho, o valor mínimo mais baixo, que neste casos corresponde aos vãos envidraçados com uma Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) igual a 30%, ao clicar no gráfico, sobre 30% ou seleccionando na caixa Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ), e o resultado é apresentado na figura 5.37.

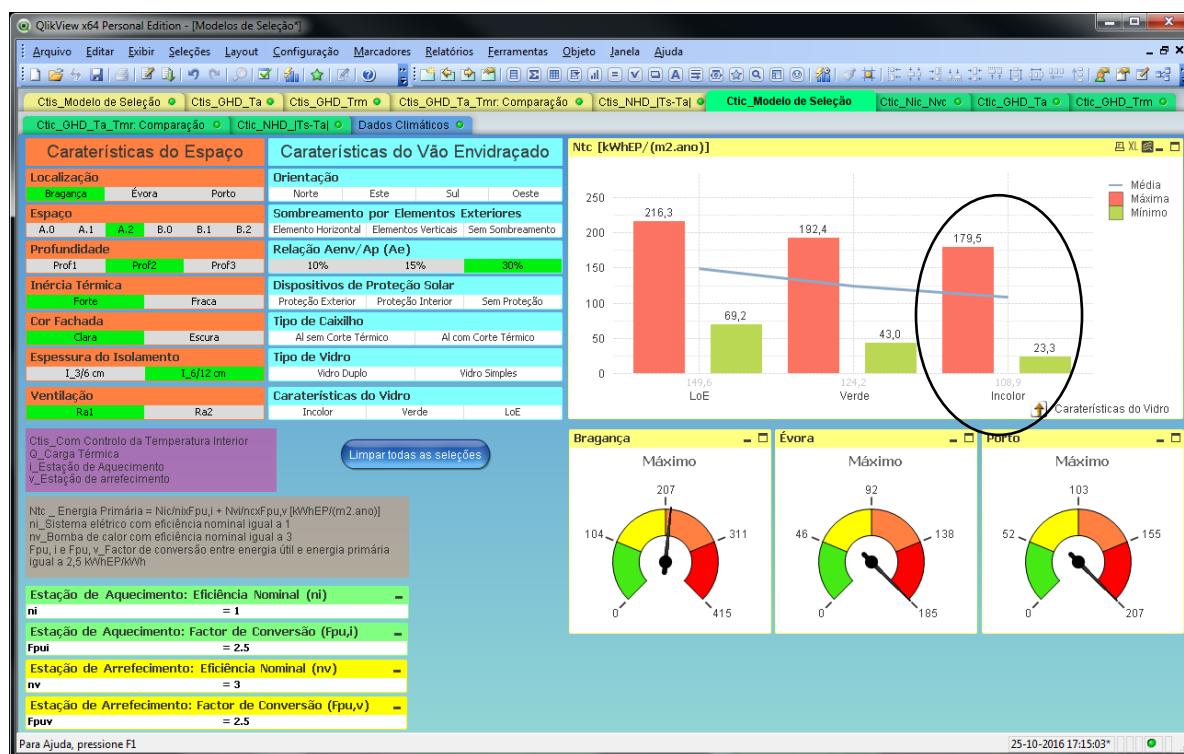


Fig.5.37 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções seleccionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ )

Na figura 5.37, podemos observar que a opção 30% da característica Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ) está seleccionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com vidro Incolor, que o decisor terá de seleccionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.38.

Na figura 5.38, podemos observar que a opção Incolor das Caraterísticas do Vidro está seleccionada, e a que melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado Sem Sombreamento por Elementos Exteriores, que o decisor terá de seleccionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.39.



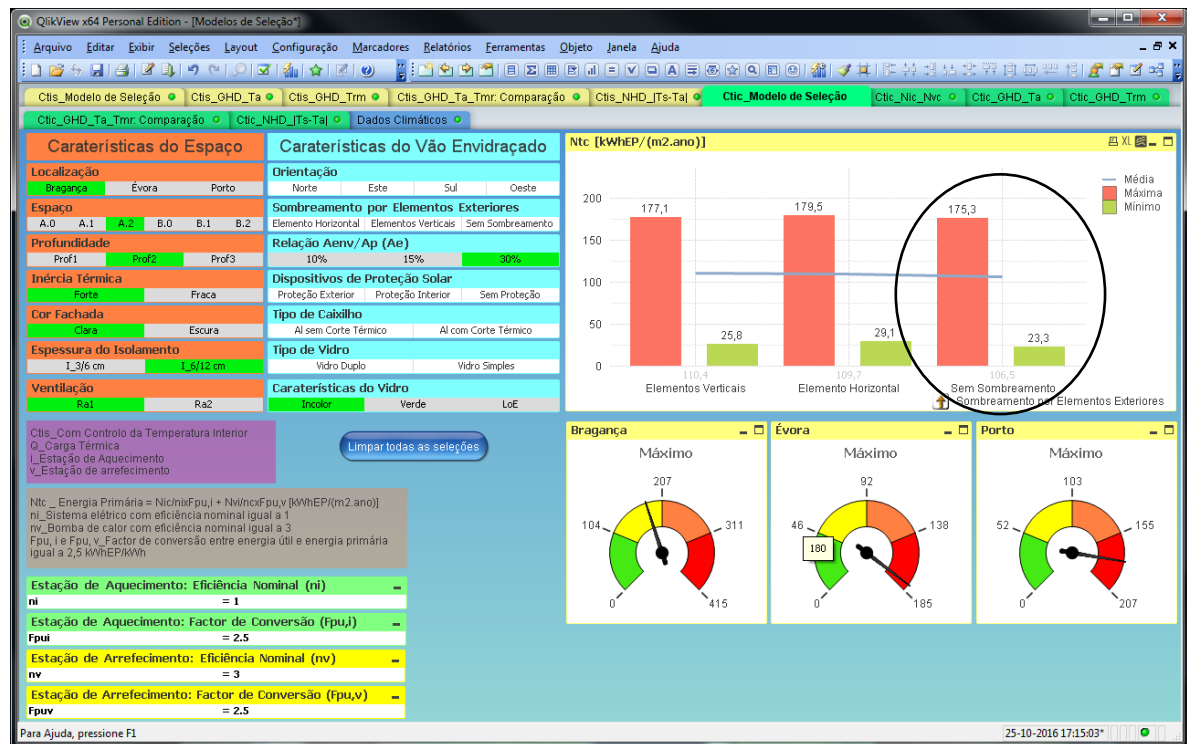


Fig.5.38 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções seleccionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (A<sub>e</sub>), Caraterísticas do Vidro

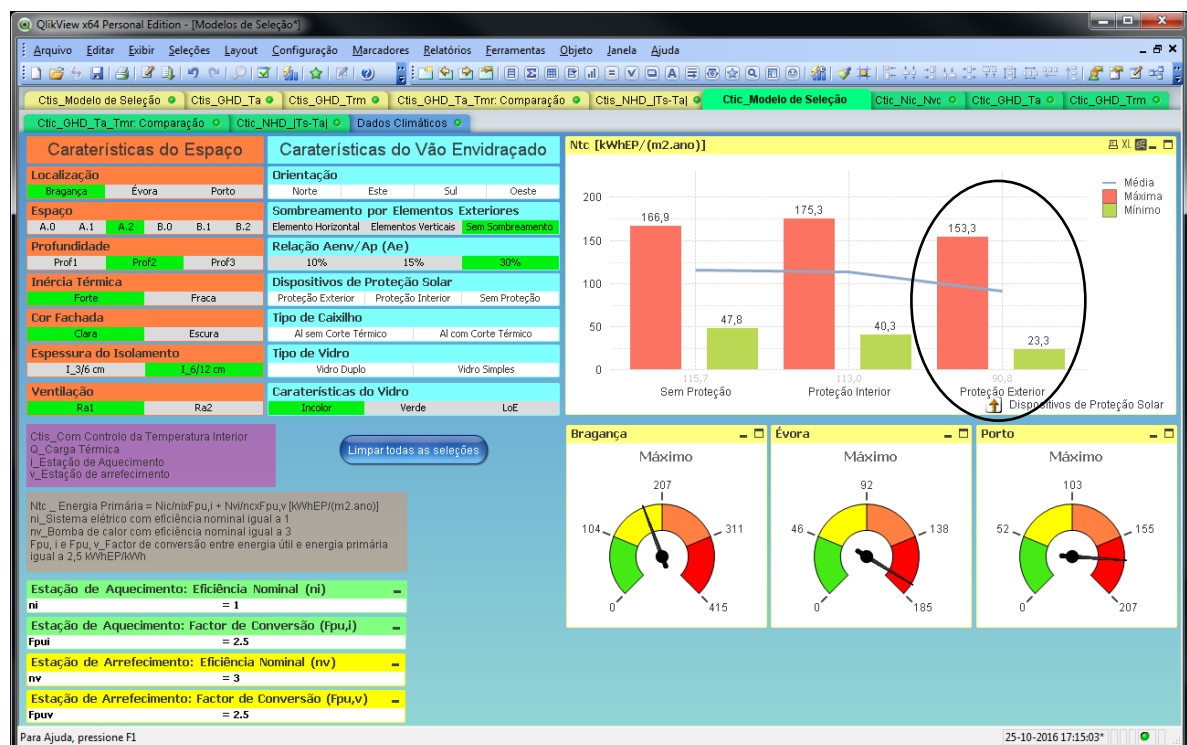


Fig.5.39 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções seleccionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (A<sub>e</sub>), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores

Na figura 5.39, podemos observar que a opção Sem Sombreamento da Característica Sombreamento por Elementos Exteriores está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com Proteção Exterior, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.40.

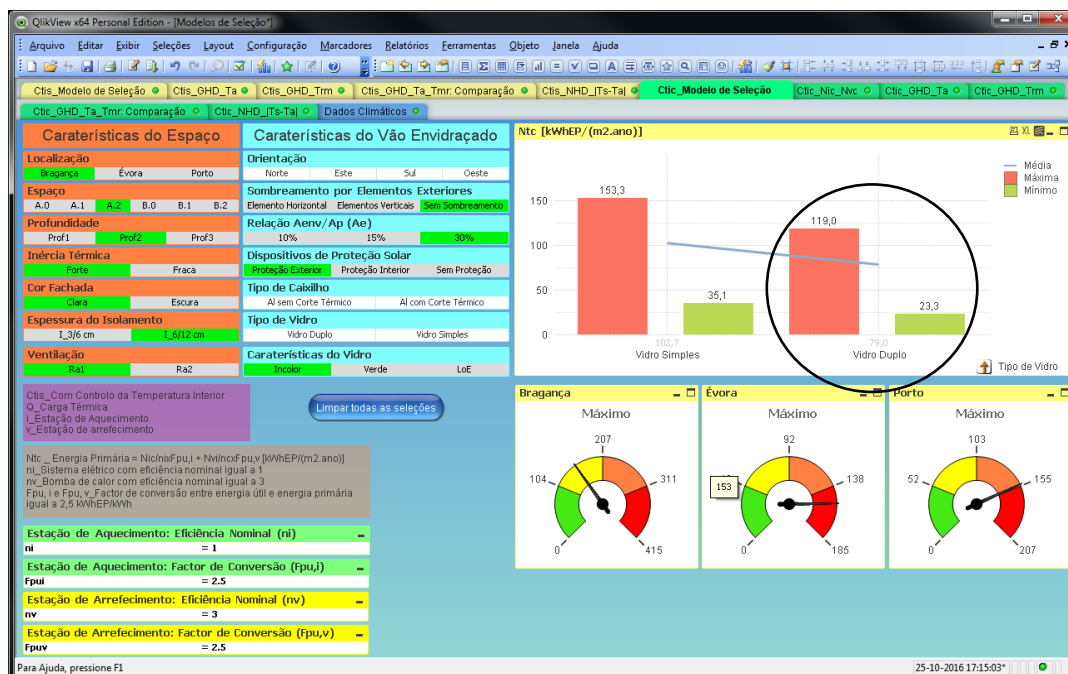


Fig.5.40 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar

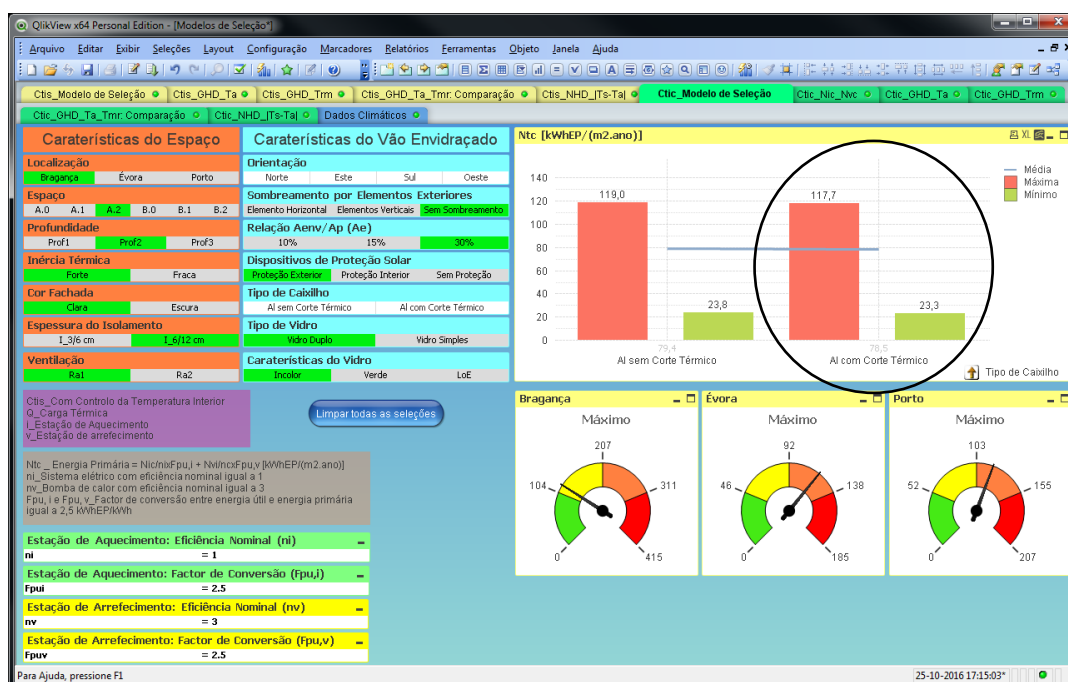


Fig.5.41 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro

Na figura 5.40, podemos observar que a opção Proteção Exterior da Caraterística Dispositivos de Proteção Solar está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com Vidro Duplo, que o decisor terá de selecionar para dar seguimento ao processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.41.

Na figura 5.41, podemos observar que a opção Vidro Duplo da Caraterística Tipo de Vidro está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado com caixilharia em Alumínio (Al) com Corte Térmico, que o decisor terá de selecionar para concluir o processo de seleção, e o resultado é apresentado na figura 5.42.



Fig.5.42 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), com as opções selecionadas relativas às caraterísticas do espaço e relativas aos vãos envidraçados: Relação  $A_{env}/A_p$  (Ae), Caraterísticas do Vidro, Sombreamento por Elementos Exteriores, Dispositivos de Proteção Solar, Tipo de Vidro, Tipo de Caixilho

Na figura 5.42, podemos observar que a opção Alumínio (Al) com Corte Térmico da Caraterística Tipo de Caixilho está selecionada, e que a melhor opção representada no gráfico corresponde ao vão envidraçado orientado a Sul.

Na figura 5.42 é também possível verificar o desempenho do vão envidraçado para os outras orientações, por exemplo, este espaço (A.2) com um vão com estas caraterísticas mas orientado a Norte, teria uma necessidade nominal anual global de energia primária,  $N_{tc}$ , de 117,7 kWhEP/(m<sup>2</sup>.ano), 5,1 vezes mais em relação à orientação Sul.

O valor mínimo obtido para a necessidade nominal anual global de energia primária,  $N_{tc}$ , é de 23,3 kWhEP/(m<sup>2</sup>.ano) e que corresponde à solução óptima de um vão envidraçado com as seguintes caraterísticas, figura 5.43:

- Relação  $A_{env}/A_p$  ( $A_e$ ): 30%;
- Características do Vidro: Incolor;
- Sombreamento por elementos exteriores: Sem Sombreamento;
- Dispositivos de Proteção Solar: Proteção Exterior;
- Tipo de Vidro: Vidro Duplo;
- Tipo de Caixilho: Al com Corte Térmico;
- Orientação: Sul.

Caraterísticas do Vão Envidraçado			
<b>Orientação</b>			
Norte	Este	Sul	Oeste
<b>Sombreamento por Elementos Exteriores</b>			
Elemento Horizontal	Elementos Verticais	Sem Sombreamento	
<b>Relação <math>A_{env}/A_p</math> (<math>A_e</math>)</b>			
10%	15%	30%	
<b>Dispositivos de Proteção Solar</b>			
Proteção Exterior	Proteção Interior	Sem Proteção	
<b>Tipo de Caixilho</b>			
Al sem Corte Térmico		Al com Corte Térmico	
<b>Tipo de Vidro</b>			
Vidro Duplo		Vidro Simples	
<b>Caraterísticas do Vidro</b>			
Incolor	Verde	LoE	

Fig.5.43. – Ctic\_Modelo de Seleção:  
Caraterísticas do vão envidraçado, com as  
opções selecionadas

Na figura 5.44, é apresentado o resultado obtido para o valor mínimo para a necessidade nominal anual global de energia primária, pelo programa Cplex da coleção GAMS. O tempo de execução foi de 1,403 segundos.

Podemos observar que o resultado da função objetivo é o mesmo, 23,3313 kWh<sub>EP</sub>/(m<sup>2</sup>.ano), e que corresponde à mesma solução ótima.

```

gamside: D:\Dados_Isabel\20_Fevereiro\Investigacao\Helena_Corvacho\lixo.gpr - [D:\Dados_Isabel\20_Fevereiro...
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
solver
Problema_teste1.lst | Problema_Teste_2.lst
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE PLI Using MIP From line 2426220

      SOLVE      SUMMARY

MODEL  PLI          OBJECTIVE  z
TYPE   MIP          DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER CPLEX        FROM LINE  2426220

**** SOLVER STATUS   1 Normal Completion
**** MODEL STATUS    1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE          23.3313

RESOURCE USAGE, LIMIT          1.403   500000.000
ITERATION COUNT, LIMIT        1719   2000000000

IBM ILOG CPLEX   May 24, 2010 23.4.3 WEX 17710.17719 WEI x86_64/MS Windows
Cplex 12.1.0, GAMS Link 34
Cplex licensed for 1 use of parallel lp, qp, mip and barrier.

Cplex MIP uses 1 of 4 parallel threads. Change default with option THREADS.
MIP status(101): integer optimal solution
Fixed MIP status(1): optimal
Proven optimal solution.

MIP Solution:          23.331281   (1719 iterations, 816 nodes)
Final Solve:           23.331281   (0 iterations)

Best possible:         23.331281
Absolute gap:           0.000000
Relative gap:           0.000000
  
```

Fig.5.44. – Ctic: Resultado obtido com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS

#### 5.4.3.4. Conclusões

Após a execução dos dois Modelos de Seleção, por seleção dos valores mínimos, obteve-se a mesma solução para as duas situações em relação ao tipo de controlo da temperatura interior: sem e com climatização. Isso, pode ser explicado pelo facto do nível de desconforto estar relacionado com as necessidades de energia para climatização, quanto maior for o desconforto maiores serão as necessidades energéticas e o contrário também é verdade, quanto menor for o desconforto menores serão as necessidades energéticas.

O programa Cplex da coleção GAMS permite, assim como o programa QlikView, resolver o problema quando nem as características do espaço nem as do vão envidraçado estão pré-definidas.

A qualquer momento o decisor pode consultar o desempenho das outras funções. Nas figuras 45 e 46 é apresentado o resultado para as funções de avaliação do desempenho relacionadas com o conforto térmico local, Número de horas com desconforto, devido à diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro (h),  $NHD_{(T_a-T_s)>5}$ , para a solução obtida após a execução dos dois modelos, para as duas situações em relação ao tipo de controlo da temperatura interior: sem e com climatização. Para esta solução, o resultado obtido para as funções de avaliação do desempenho  $NHD_{(T_a-T_s)>10}$  foi nulo.

Das figuras anteriores podemos observar que no geral, quando se faz a climatização dos espaços a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura exterior é maior o que pode originar que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura no centro no centro do vidro seja maior e durante mais horas, principalmente durante a noite na estação de aquecimento.

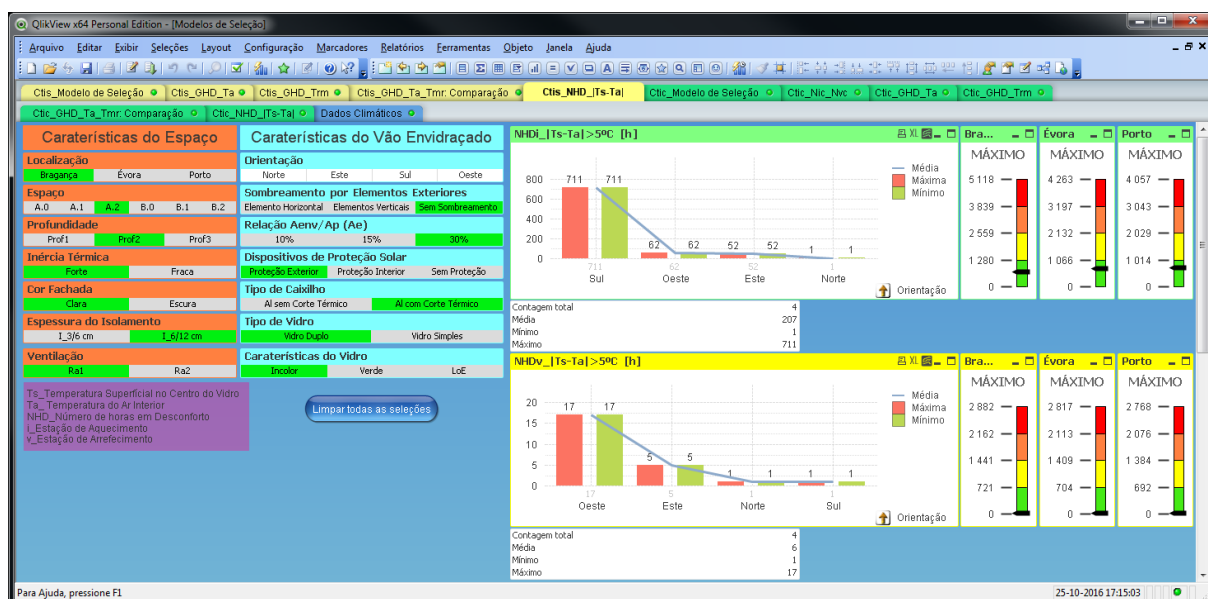


Fig.5.45. – CtIs\_Modelo de Seleção: NHD  $(T_a-T_s)>5$

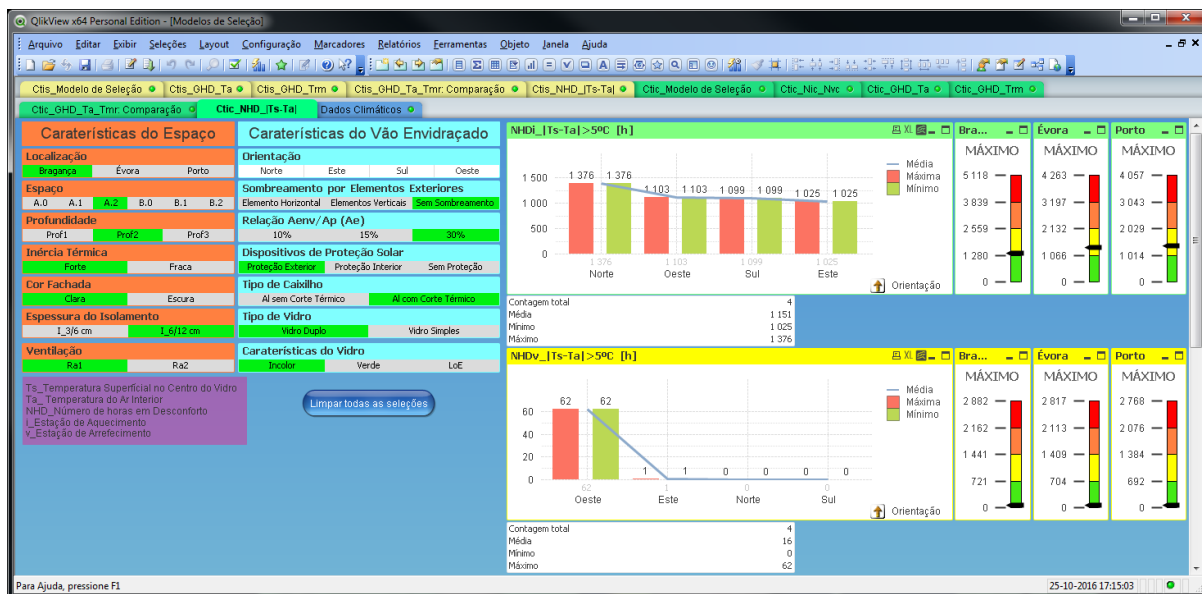


Fig.5.46. – Ctic\_Modelo de Seleção: NHD (ITa-Ts)&gt;5)

Das figuras anteriores podemos observar que no geral, quando se faz a climatização dos espaços a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura exterior é maior o que pode originar que a diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura no centro no centro do vidro seja maior e durante mais horas, principalmente durante a noite na estação de aquecimento.

A qualquer momento o decisor pode consultar o desempenho para outras localizações geográficas, Évora e Porto. Nas figuras 47 e 48 é apresentado o resultado para Ctic\_Modelo de Seleção, para o mesmo tipo de espaços e para o mesmo tipo de vão envidraçado.



Fig.5.47 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), para Évora





Fig.5.48 – Modelo de Seleção (Ctic\_Modelo de Seleção), para o Porto

Das figuras anteriores podemos observar que, para estas localizações, a necessidade nominal anual global de energia primária, para todas as orientações é menor. Para este espaço localizado no Porto ( $I_1, V_2$ ), a necessidade nominal anual global de energia primária para os vãos envidraçados orientados a Sul é muito inferior, baixando dos  $23,3 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{ano})$  obtidos para Bragança ( $I_3, V_2$ ), dos  $12,0 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{ano})$  obtidos para Évora ( $I_1, V_3$ ), para os  $1,5 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{ano})$ .





# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Com esta Tese pretendeu-se compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico da envolvente e do conforto térmico interior dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, sem e com climatização (aquecimento e arrefecimento) e, desta forma, aferir sobre a contribuição destes para a eficiência energética, tendo em vista, o desenvolvimento de um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados.

Diversos dados estatísticos referem que cerca de 30 a 50% da energia primária a nível global é consumida por edifícios não industriais, tornando implícita a necessidade de inverter esses números.

O impacto ambiental dos edifícios, sejam eles novos ou existentes, pode ser minimizado com um projeto térmico em que todos os elementos da envolvente são criteriosamente selecionados, particularmente na fase inicial, de forma, a otimizar a utilização da radiação solar e a minimizar as perdas térmicas no inverno e os ganhos térmicos no verão, reduzindo deste modo, a utilização dos combustíveis fósseis.

Como resultado de novas expressões arquitetónicas e certos avanços tecnológicos, os vãos envidraçados ganham cada vez maior destaque na arquitetura atual. Os vãos envidraçados são os elementos da envolvente dos edifícios que mais podem contribuir, ou não, para a eficiência energética dos edifícios, contribuindo para as perdas térmicas mas também com ganhos através da captação da energia solar. Mas, são também elementos perturbadores na obtenção de conforto térmico, quer devido a ganhos indesejados de calor, quer devido a assimetrias radiantes e quer devido a correntes de ar provenientes de infiltrações.

A seleção fundamentada dos vãos envidraçados para a envolvente dos edifícios, que tem motivado a realização de estudos com vista à sua seleção e otimização, carece de um conhecimento aprofundado do desempenho das soluções possíveis tendo em consideração as características relacionadas com os vãos envidraçados (orientação, sombreamento por elementos exteriores, área envidraçada, caixilho, vidro, dispositivos de proteção solar, etc.) e com os edifícios onde se inserem (localização, profundidade dos compartimentos, revestimento e isolamento térmico da envolvente exterior, inércia térmica, ventilação e controlo da temperatura interior, etc.).

O enquadramento legislativo do uso de energia em edifícios, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, pretende assegurar que as exigências de conforto térmico, sejam de aquecimento ou arrefecimento, de ventilação ou de necessidade de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem gastos excessivos de energia.

Com a realização da presente Tese procurou-se desenvolver um trabalho que permitisse atingir dois objetivos principais:

- Caracterizar as condições de conforto térmico dos ocupantes no centro de um compartimento e nas zonas próximas dos vãos;
- Propor um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados a aplicar em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços.

## 6.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

Podemos concluir que o trabalho desenvolvido permitiu compreender melhor o impacto dos vãos envidraçados no desempenho térmico da envolvente e do conforto térmico interior dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, sem e com climatização (aquecimento e arrefecimento) e, desta forma, aferir sobre a contribuição destes para a eficiência energética. E, permitiu propor um modelo simplificado de seleção para as características relacionadas com os vãos envidraçados.

Para atingir estes objetivos, foi necessário realizar dois grandes trabalhos:

- Avaliação experimental do desempenho térmico e do conforto térmico de dois espaços de um estabelecimento de ensino superior, uma sala de aulas e um gabinete técnico localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu;
- Simulação numérica dos edifícios onde estão inseridos, os dois espaços monitorizados, a sala de aulas e o gabinete técnico e de um modelo de um edifício tipo com varias configurações e soluções construtivas.

Os resultados obtidos nas campanhas experimentais permitiram fundamentar a análise crítica dos modelos de avaliação da qualidade do ambiente interior atualmente mais utilizados, comparar as condições verificadas no centro e a 1,20 m do vão envidraçados e validar as opções adoptadas para a otimização das soluções construtivas relacionadas com os vãos envidraçados, nomeadamente no que diz respeito à caracterização dos vãos envidraçados, à profundidade dos compartimentos e utilização dos elementos de sombreamento.

A avaliação experimental serviu também para validar a simulação numérica e fornecer uma primeira caracterização das condições de conforto térmico em compartimentos com uma área de envidraçados considerável.

Para apresentar a otimização do desempenho térmico e do conforto no interior de um edifício, com base no resultado de funções de avaliação do desempenho, foi criado um modelo de um edifício com três pisos, constituído por diferentes espaços, com diferentes condições de envolvente (localização no edifício, área da fachada, cor da fachada, espessura de isolamento térmico da envolvente exterior, inércia térmica, área de envidraçado, tipo de caixilho e de vidro, utilização de diferentes sistemas de proteção solar e de sombreamento por elementos exteriores e ventilação), profundidade e controlo da temperatura interior, para diferentes orientações da fachada e diferentes localizações geográficas para o clima português, cuja geometria corresponde a situações construtivas correntes. Posteriormente, procedeu-se à proposta de um modelo simplificado de seleção para os vãos envidraçados, sem e com climatização, de modo, a obter-se o valor mínimo, solução ótima, para as funções de avaliação do desempenho, de forma a garantir as condições de conforto térmico no interior dos espaços, ao nível global de acordo com os limites definidos para a temperatura do ar no REH e local tendo em

consideração a diferença, em valor absoluto, entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior no centro do vidro.

As conclusões mais importantes retiradas dos estudos efetuados relativas à avaliação experimental, apesar do espaço temporal em que foram realizadas as medições ser limitado e corresponder a condições climáticas exteriores específicas e a amostra escolhida não permitir uma caracterização completa do desempenho dos vãos envidraçados e nos espaços monitorizados os vãos envidraçados terem a mesma orientação, são as seguintes:

- A temperatura do ar interior nas zonas mais próximas dos vãos envidraçados é superior à temperatura registada no centro dos espaços durante o verão, estação de arrefecimento, durante a estação de aquecimento, tal só se verifica, quando a radiação solar incide diretamente no interior do espaço;
- A incidência da radiação direta nas pessoas que têm o seu posto de trabalho nas zonas próximas dos vãos envidraçados, pode provocar sensações de desconforto, principalmente quando a trajetória do Sol é mais baixa;
- Os índices PMV e PPD permitem avaliar as condições de conforto tanto no centro dos espaços como nas zonas próximas dos vãos envidraçados, sendo sensível à variação da temperatura média radiante e à temperatura do ar;
- Comparando os índices PMV e PPD com o método gráfico simplificado, podemos concluir que o resultado da análise às condições de conforto térmico é muito semelhante;
- Os limites definidos para o método gráfico simplificado têm por base os índices PMV e PPD, as zonas de conforto foram definidas admitindo que 80% dos ocupantes estão satisfeitos com o ambiente térmico do espaço, este limite, corresponde às condições aceitáveis de conforto térmico definidas para os índices PMV (-0,5 a +0,5) e PPD (<10%);
- O método gráfico simplificado poder ser utilizado sem recurso a grandes meios para a medição e caracterização das condições de conforto de um espaço interior;
- Os modelos adaptativos só podem ser aplicados em condições muito específicas, nomeadamente: de temperaturas médias mensais exteriores; níveis de atividade dos ocupantes; velocidade do ar interior. Os limites definidos para os modelos adaptativos modelos têm por base os índices PMV e PPD;
- Evidenciaram-se algumas limitações das metodologias de conforto adaptativo apresentadas para a avaliação do ambiente térmico de um espaço interior, nomeadamente durante a estação de aquecimento, nomeadamente o Modelo da ASHRAE, que só se pode aplicar na estação de arrefecimento;
- O modelo adaptativo proposto pelo LNEC representa com muita fiabilidade as condições de conforto térmico interior, para o clima português. Para caracterizar o conforto térmico interior, com alguma fiabilidade não será necessário utilizar equipamentos de medição muito complexos e sofisticados (estações microclimáticas), bastando apenas sondas de temperatura, humidade relativa e velocidade do ar;
- Para edifícios de habitação, nos modelos adaptativos analisados e no método gráfico simplificado podemos utilizar os registos da temperatura do ar interior em substituição dos registos da temperatura operativa, visto que existe uma correlação muito elevada entre eles;

- Durante o verão, estação de arrefecimento, para os espaços com vãos envidraçados orientados a Sul é de extrema importância a utilização de sombreamento por elementos exteriores, pala horizontal. Os registos da temperatura do ar no centro e a 1,20 m do vão envidraçado foram muito semelhantes, sendo que a 1,20 m do vão envidraçado os ocupantes têm uma sensação de calor ligeiramente superior;
- Durante o verão, estação de arrefecimento, para os espaços com vãos envidraçados orientados a Sul sem sombreamento por elementos horizontais (pala horizontal) é de extrema importância a utilização dos dispositivos de proteção solar. Durante a estação de aquecimento a utilização dos dispositivos de proteção solar também pode ser importante, principalmente quando existe incidência direta da radiação solar, que pode originar condições de desconforto por excesso de calor;
- Durante o verão, estação de arrefecimento, podemos concluir que a abertura dos vãos envidraçados e circulação do ar nos espaços contribui para a melhoria das condições de conforto no centro, mas a 1,20 m do vão podemos obter condições de desconforto por excesso de calor, devido à entrada de calor nas horas mais quentes. Por essa razão, no verão, não se recomenda a abertura dos vãos envidraçados se a temperatura do ar exterior estiver mais quente que a temperatura do ar interior;
- Durante a estação de aquecimento, podemos concluir que a abertura dos vãos envidraçados, e circulação do ar nos espaços contribui para a melhoria das condições de conforto no centro, quando se verifica o sobreaquecimento, devido à incidência direta da radiação solar, mas a 1,20 m do vão podemos obter condições de desconforto devido à entrada de ar mais frio;
- Durante a estação de arrefecimento, podemos concluir que não é possível obter condições de conforto nos espaços, sem qualquer sistema de climatização, para relações entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento elevadas, principalmente para espaços com menor profundidade e nas zonas próximas dos vãos envidraçados;
- Durante a estação de aquecimento, nos dias de céu limpo, podemos concluir que é possível obter condições de conforto no gabinete, mesmo sem qualquer sistema de climatização, para relações entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento elevadas, podemos obter condições de desconforto por excesso de calor, para espaços com menor profundidade e nas zonas próximas dos vãos envidraçados, devido à incidência direta da radiação solar.

As conclusões mais importantes retiradas dos resultados obtidos da simulação numérica, para além de se terem criados dois modelos simplificados para os vãos envidraçados, sem e com sistema de climatização, a aplicar em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços, com diferentes condições de envolvente (área da fachada, área de envidraçado, tipo de envolvente, profundidade, cor da fachada, tipo de caixilho e de vidro, utilização de diferentes sistemas de proteção solar e de sombreamento por elementos exteriores, espessura de isolamento térmico, tipo de inércia térmica, e ventilação natural), para diferentes orientações da fachada e diferentes localizações, são as seguintes:

- Os modelos de simulação desenvolvidos permitiram confirmar o impacto da orientação, da relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento e da localização do espaço que servem e geografia do edifício no seu desempenho térmico e na necessidade de energia para climatização;
- Devido ao elevado número de combinações simuladas, 2 239 488 (1 119 744\_Ctis e 1 119 744\_Ctic) e de funções de avaliação do desempenho calculadas, 20 (10\_Ctis e 10\_Ctic), para apresentar e analisar de uma forma rápida e intuitiva os resultados obtidos foi utilizado um

programa de *Business Intelligence* (BI) o programa QlikView, através da criação uma interface gráfica (aplicação), constituída por vários Separadores;

- A análise paramétrica das características dos vãos envidraçados permitiu definir a importância relativa de cada uma das características dos vãos envidraçados, em função da sua orientação, no desempenho térmico e na necessidade de energia para climatização dos espaços, pela seguinte ordem decrescente de importância, relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento, características do vidro, sombreamento por elementos exteriores, dispositivos de proteção solar, tipo de vidro e tipo de caixilho;
- Quanto à metodologia proposta para se obter a solução ótima, solução que minimize as funções de avaliação do desempenho, recorreu-se a gráficos apresentados na interface gráfica criada no programa QlikView, para esse efeito através da seleção das opções com o melhor desempenho numa sequência de variáveis ou por escolha do decisor. Este processo foi validado com a utilização do programa Cplex da coleção GAMS;
- A aplicação desenvolvida no programa QlikView permite que o decisor possa utilizar os modelos de seleção, sem e com climatização;
- Esta aplicação permite ainda que o decisor, de uma forma simples, possa fazer uma análise paramétrica tendo em consideração todas as opções estudadas, podendo selecionar tanto as características do espaço como as características dos vãos envidraçados, para todas as funções de avaliação do desempenho.

### 6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

São apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros que possam complementar e dar continuidade a esta Tese:

- Fazer uma avaliação experimental para outras orientações e condições climáticas;
- Fazer uma avaliação experimental que permita avaliar a contribuição de cada elemento que constitui o vão envidraçado;
- Devido ao elevado número de simulações anuais do desempenho que foram realizadas e da imensa quantidade de dados que devem ser utilizados na validação dos modelos simplificados, propõe-se que sejam estudadas metodologias simplificadas de avaliação do desempenho, que possam substituir as simulações anuais, reduzindo de forma significativa o tempo de cálculo e facilitando assim a sua utilização prática em outras situações. A vasta quantidade de dados que resultaram das simulações desenvolvidas nesta Tese poderá ajudar na validação desses métodos;
- Fazer uma análise mais aprofundada que permita avaliar o desempenho em função das características do espaço;
- Ampliar o alcance dos modelos propostos, desenvolvendo a sua aplicação a outras localidades;
- Desenvolver e divulgar a aplicação (modelos de seleção) criada no programa QlikView para que possa ser utilizada por projetistas.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] DGGE, Eficiência Energética – Estatísticas, Indicadores Energéticos. Disponível em <URL: <http://www.dgge.pt/>> (Consultado em abril de 2011).
- [2] INE, I.P./DGEG. *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. 2011, Lisboa Portugal.
- [3] McCartney, Kathryn, Nicol, Fergus. J., *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 623–635, 2002.
- [4] Matias, Luís M. C., *Desenvolvimento de um Modelo Adaptativo para Definição das Condições de Conforto Térmico em Portugal*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [5] Matias, Luís M. C., et al, *Adaptive Thermal Comfort for Buildings in Portugal based on Occupants' Thermal Perception*. PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009.
- [6] La Gennusa, M, et al, *A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort*. Solar Energy, Volume 81, págs. 594–606, 2007.
- [7] Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio - *Relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (reformulação)*.
- [8] Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (SCE:REH e RECS)*.
- [9] Oliveira, A. M., *Avaliação da Qualidade Térmica dos Edifícios. Proposta de Indicadores para o Projecto*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2007.
- [10] EnergyPlus (<http://www1.eere.energy.gov/buildings/>). Consultado em janeiro de 2011.
- [11] DesignBuilder. DesignBuilder Software Ltd. (<http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/>). Consultado em setembro de 2010.
- [12] ISO 15 099 - *Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices – Details Calculations*, International Organization for Standardization, Geneva, 2003.
- [13] Abrantes, João B. C., *Implicações do Conforto Térmico no Consumo Energético – Uma Hipótese de Modelo Adaptativo Aplicada ao Verão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [14] Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro - *Relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios*.
- [15] Silva, P. C., *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2006.
- [16] LiderA, *Sistema de Avaliação da Sustentabilidade*. Disponível em <http://www.lidera.info/?p=MenuPage&MenuId=29>. (Consultado em abril de 2012).
- [17] Rodrigues, A., Piedade, A., Canha, Braga, A. *Térmica de Edifícios*. Edições ORION, Amadora, 2009.
- [18] Santamouris, M., Asimakopoulos, D., *Passive Cooling of Buildings*. James & James, 2001. ISBN 1873936478.

- [19] Santos, C., Matias, L., *Coeficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, ITE 50. LNEC, Lisboa, 2006.
- [20] Santos, António J., *A Iluminação Natural e A Iluminação Artificial - Seminário - Ambiente em Edifícios Urbano*, Lisboa, LNEC, 2000.
- [21] Pinto, M., *Sistema de Ventilação Natural e Misto em Edifícios de Habitação*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2008.
- [22] Corvacho, M. H., *Catálogo de Pontes Térmicas – Nota de Informação Técnica – NIT – 003-LFC – FEUP*, 1999.
- [23] Abreu, M. I., *Reabilitação de Pontes Térmicas em Intervenções de Reabilitação*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2003.
- [24] Viegas, J. C., *Comportamento dos Edifícios – Selecção de Caixilharia e seu Dimensionamento Mecânico*, Lisboa, LNEC, 2006. ITE 51.
- [25] Roriz, L., Gonçalves A., *Os problemas da utilização de métodos de simulação de cargas térmicas e consumo energético na auditoria energética para verificação dos Requisitos Energéticos dos edifícios*. Revista O Instalador n.º 91, 34-37, Novembro 2003.
- [26] EnergyPlus Developmant Team. EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, 2009.
- [27] Ramos, N., *A importância da Inércia Higroscópica no Compartimento Higrotérmico dos Edifícios*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2007.
- [28] Delgado, J. M. P. Q. *et al*, *Numerical Simulation of Exterior Condensations on Façades: The Undercooling Phenomenon. valiação do Desempenho Higrotérmico*. Proceedings of the Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XI Internacional Conference, Clearwater Beach, USA, 5-9 de dezembro de 2010.
- [29] Crawley, D. B. *et al*, *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*. Building Energy Tools Directory Repor, 2005.
- [30] Almeida, Ricardo M. S. F., *Avaliação do Desempenho Higrotérmico do Parque Escolar Reabilitado*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2011.
- [31] Crawley, D. B. *et al*, *EnergyPlus: EnergyPlus Program*. ASHRAE Journal, 42, p. 49-56, 2000.
- [32] Silva, S. M., *A Sustentabilidade e o Conforto das Construções*. Dissertação de Doutoramento, U. M., 2009.
- [33] Feustel, H. E., *An International Multizone Airflow and Contaminant Transport Model*. Report LBNL-42182, Lawrence Berkeley, USA, 1998. <http://epb.lbl.gov/publications/pdf/lbnl-42182.pdf>. Consultado em setembro de 2015.
- [34] EnergyPlus Engineering Reference, 2010. Disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_documentation.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm). (Consultado em abril de 2011).
- [35] Strand, R. K., *et al*, *Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE loads toolkit and EnergyPlus*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference Building Performance Simulation. Rio de Janeiro, Brasil 13-15 de agosto de 2001.



- [36] DesignBuilder, DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide, DesignBuilder Software Ltd., UK, 2009. Disponível em [http://sbi.dk/download/bsim/contrasting\\_the\\_capabilities\\_of\\_building\\_energy\\_performance\\_simulation\\_programs\\_v1.0.pdf](http://sbi.dk/download/bsim/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf). Consultado em setembro de 2015.
- [37] ANSI/ASHRAE Standard 55 - *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2010.
- [38] ASHRAE – Handbook of Fundamentals (2009).
- [39] Fanger, P. O. *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [40] EN ISO 7 730 - *Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [41] van Hoof, J., *Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all?*. Indoor Air, Volume 18, págs. 182–201, 2008.
- [42] Charles, K. E., *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa, K1A 0R6, Canada. IRC-RR-162, 2003.
- [43] Parsons, K., *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 3.<sup>a</sup> Edição 2002.
- [44] Fanger, P., Toftum, J., *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*. Energy and Buildings, vol. 34, p. 533-536, 2002.
- [45] EN ISO 7 726 - *Ergonomics of the Thermal Environment. Instruments for Measuring Physical Quantities*. International Organization for Standardization, Geneva, 2001.
- [46] EN 15 251 - *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustic*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2007.
- [47] Santamouris, M., *Adaptive Thermal Comfort and Ventilation*. VIP n.º 12, AIVC, 2006.
- [48] Brager, G., De Dear R., *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*. Energy and Buildings, Volume 27, págs. 83–96, 1998.
- [49] Brager, G., Paliaga, G., De Dear R., *The Effect of Personal Control and Thermal Variability on Comfort and Acceptability*. Final Report, ASHRAE RP-1161, 2004.
- [50] De Dear R., Brager, G., Cooper, D. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. Final Report, ASHRAE RP-884, 1997.
- [51] LNEC, *Avaliação das Condições Ambientais de um Apartamento em Matosinhos em Situação de Utilização Corrente. Inverno de 2003*. NRI, Relatório 301/03, 2003.
- [52] Nicol, J. F., Humphreys, M. A. *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 563–572, 2002.
- [53] Nicol, F., Humphreys, M. A., *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251*. Building and Environment 45, p. 11-17, 2010.
- [54] Nicol, F., Humphreys M. A., *New standards for comfort and energy use in buildings*, Building Research & Information, 37:1, 68-73, 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/09613210802611041>

- [55] Boestra, A. *The Adaptive Thermal Comfort Criterion in the New EPBD IEQ STANDARD*. Atas do Congresso Internacional “Comfort and Energy Use in Buildings. Getting then Right”. Windsor, 2006.
- [56] Chvatal, K., *Relação entre o Nível de Isolamento Térmico da envolvente dos edifícios e o Potencial de Sobreaquecimento no Verão*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2007.
- [57] Bessoudo, M., *et al*, *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices e Part I: Experiments and building thermal model*. Building and Environment Volume 45, págs. 2506-2516, 2010.
- [58] Bessoudo, M., *et al*, *Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices e Part II: Experiments and building thermal model*. Building and Environment Volume 45, págs. 2517-2525, 2010.
- [59] Bessoudo, M., *et al*, *Simulation of Thermal Comfort conditions in Highly Glazed Perimeter Zones with Shading Devices*. 2nd Canadian Solar Buildings Conference, Calgary, June 10 - 14, 2007.
- [60] La Gennusa M., *et al*, *The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm*. Building and Environment, Volume 40, págs. 367–375, 2005.
- [61] Costanzo, S., *et al*, *Thermo-hygrometric Well-Being in Air-Conditioned Hospital Rooms by Means of a primary Air System Integrated with Radiant Panels*, 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD'08) Algarve, Portugal, junho 11-13, 2008.
- [62] La Gennusa, M., *et al*, *The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation — a generalised algorithm*. Building and Environment, Volume 40, págs. 367–375, 2005.
- [63] La Gennusa, M., *et al*, *A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort*. Solar Energy, Volume 81, págs. 594–606, 2007.
- [64] Rizzo, G., *et al*, *Algorithms for the Calculation of the mean projected area factors of Seated and Standing person*, Int. J. Energy Building, Volume 17 (3), págs. 221–230, 1991.
- [65] Fanger, P., *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Book Company, United States, New York, 1972.
- [66] Fanger, P., *Thermal Comfort*. Florida, United States, R. Krieger, 1982.
- [67] LÍlian Dobrowolski, L., *Numerical Method for Calculating View Factor Between Two Surfaces*. Proceedings: Building Simulation 2007.
- [68] Humphreys, M. A., Rijal, H. B., Nicol, J. F., *Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors*. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010.
- [69] Nicol, J. F., Rijal, H. B., Humphreys, M. A., *Characterising the use of windows in thermal simulation*. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Greece, 2007.
- [70] Nicol, F., Humphreys, M. A., *Maximum temperatures in buildings to avoid heat discomfort*. Internacional conference on passive and low energy cooling for the built environment (PALENC). Santorini, Greece, 2005. p. 219-224.

- [71] Nicol, F., Humphreys, M. A., *Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort*. Solar Energy, Volume 81, págs. 295–304, 2007.
- [72] Poirazis, H., *Double Skin Façades: A Literature Review*, A report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43, 2006.
- [73] Matias, L., *Conforto Térmico em Ambientes Interiores, Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos*. Lisboa, 2000.
- [74] Viegas, J. C., *Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios - Seminário - Ambiente em Edifícios Urbanos*. Lisboa, LNEC, 2000.
- [75] Olesen, B. W., Parsons, K. C., *Introduction to Thermal Comfort Standards and to the Proposed New Version of EN ISO 7730*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 537–548, 2002.
- [76] EN ISO 8 996 - *Ergonomics of the Thermal Environment. Determination of Metabolic Rate*. International Organization for Standardization, Geneva, 2004.
- [77] EN ISO 9 920 - *Ergonomics of the Thermal Environment. Estimation of the Thermal Insulation and Evaporative Resistance of a Clothing Ensemble*. International Organization for Standardization, Geneva, 2007.
- [78] ISO/TS 14415 - *Ergonomics of the Thermal Environment. Application of International Standards to People with Special Requirements*. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [79] Decreto-Lei n.º 40/1990 de 6 de fevereiro - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (RCCTE).
- [80] Decreto-Lei n.º 156/1992 de 29 de julho - *Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios* (EQSECE).
- [81] Decreto-Lei n.º 118/1998 de 7 de maio - *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios* (RSECE).
- [82] Decreto-Lei n.º 80/1990 de 4 de abril - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (RCCTE).
- [83] Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril - *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios* (RSECE).
- [84] Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril - *Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios* (SCE).
- [85] Decreto-Lei n.º 243/1986 de 20 de Agosto - *Regulamento Geral de Higiene e Segurança do Trabalho nos Estabelecimentos Comerciais, de Escritório e Serviços* (RGHST).
- [86] NP 14 351.1 – *Janelas e Portas. Normas de produto, características de desempenho. Parte 1: Janelas e portas pendorais exteriores sem características de resistência ao fogo e/ou de estanquidade ao fumo*, Lisboa, IPQ, 2008.
- [87] Martins, A. M., *Reabilitação Térmica e Eficiência Energética de Vãos Envidraçados*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [88] SAVE – Establishment of European Window Energy Rating System (EWERS) – *Final Project Report*. SAVE Contract – 4.1031/Z00-030/2000, [www.bfrc.org](http://www.bfrc.org). Consultado em fevereiro de 2010.

- [89] Avasoo, D. *European Window Energy Rating System, EWERS: the European window energy labeling challenge*. In ECEEE 2007 Summer Study - Saving Energy – Just it. 1.<sup>a</sup> ed. La Colle sur Loup: ECEEE, junho 2007. Vol. 1. ISBN: 978-91-633-0899-4.
- [90] Carlos, Jorge S., *Sistema Passivo de Pré-Aquecimento do Ar de Ventilação. A Dupla Janela Ventilada*. Dissertação de Doutorado, Universidade da Beira Interior, 2009.
- [91] Saint-Gobain Glass, *Manual do Vidro*, 2008.
- [92] Mendonça, J., *Habitar uma Segunda Pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados*. Dissertação de Doutorado, Universidade do Minho, 2005.
- [93] Guide de la Fenêtre: <http://www.guide-de-la-fenetre.com/>. Consultado em março de 2011.
- [94] Sardeiro, Paula S., *Parâmetros para a escolha de superfícies translúcidas visando o conforto térmico e visual na edificação*. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Brazil, 2007. Disponível em <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp033676.pdf>. Consultado em maio de 2015.
- [95] Cardoso, C., *Desenvolvimento da Janela Eco Eficiente*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2008.
- [96] Janela Eco Eficiente: <http://terrapalha.blogspot.com/2008/11/janela-eco-eficiente.html>. Consultado em janeiro de 2011.
- [97] BFRC – British Fenestration Rating Council. *The UK's national system for rating Energy Efficient Windows*, <http://www.bfrc.org/>. Consultado em dezembro de 2010.
- [98] LBNL – Lawrence Berkeley National Laboratory (2004), Energy Performance of Buildings Group (PEB), <http://epb.lbl.gov/>. Consultado em janeiro de 2011.
- [99] NFRC – National Fenestration Rating Council Incorporated, [www.nfrc.org](http://www.nfrc.org). [Consultado em janeiro de 2011].
- [100] Window Energy Rating: *A plea from the fenestration industry*. London junho de 2010.
- [101] SEEP – Sistema de Etiquetagem Energética de Produtos, <http://www.seep.pt> [Consultado em agosto de 2014].
- [102] Huizenga, C. *et al*, *Windows Performance for Human Comfort – Final Report to National Fenestration Rating Council*. Center for the Built Environment, Universidade da Califórnia, Berkeley, 2006.
- [103] Zhang, H., *et al*, *Thermal Sensation and Comfort in Transient Non-Uniform Thermal Environments*. European Journal of Applied Physiology, vol. 92, p.728-733.
- [104] Zhang, H., *Human Thermal Sensation and Comfort in Transient Non-Uniform Thermal Environments*. Dissertação de Doutorado, Universidade da Califórnia, Berkeley, 2003.
- [105] Zhang, H., *et al*, *Considering Individual Physiological Differences in a Human Thermal Model*. Journal of Thermal Biology, vol. 26 (4-5), p.401-408.
- [106] Poirazis, H., *Single and Double Skin Glazed Office Buildings: Analyses of Energy Use and Indoor Climate*. Dissertação de Doutorado, Lund University, Suécia (2008).
- [107] Rijal, H. *et al*, *Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings*. Energy and Buildings, Volume 39, págs. 823–836, 2007

- [108] Serra, V., Zanghirella, F., Perino, M., *Experimental evaluation of a climate façade: Energy efficiency and thermal comfort performance*. Energy and Buildings, Volume 42, pp. 50–62 (2010).
- [109] De Dear, R., Brager, G., *Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revision to ASHRAE Standard 55*. Energy and Buildings”, Vol. 34, 2002, p. 549-561.
- [110] BESTFAÇADE, *Best Practice for Double Skin Façades*, EIE/04/135/S07.38652. <http://www.bestfacade.com>. [Consultado em novembro de 2010].
- [111] Flamant, G., Heijmans, N. Guiot, E., *Ventilated Double Facades*. Belgian Building Research Institute (BBRI), 2004.
- [112] Lawrence Berkeley National Laboratory (2004), Energy Performance of Buildings Group (PEB), (<http://epb.lbl.gov/>). Consultado em janeiro de 2011.
- [113] BFRC – British Fenestration Rating Council. *The UK’s national system for rating Energy Efficient Windows*, <http://www.bfrc.org/>. Consultado em dezembro de 2010.
- [114] LBNL – Lawrence Berkeley National Laboratory (2004), Energy Performance of Buildings Group (PEB), <http://epb.lbl.gov/>. Consultado em Janeiro de 2011.
- [115] NFRC – *Manual do programa Window e do programa Therm*, <http://windows.lbl.gov/software/NFRC/NFRCSim6.3-2010-Manual.pdf>. Consultado em janeiro de 2011.
- [116] Gameiro Silva, M., *Aplicações Computacionais para a Avaliação do Conforto Térmico*. ADAI - Departamento de Engenharia Mecânica Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [117] Tastón, M. H., *Experimental and Computational Evaluation of Thermal Performance and Overheating in Double Skin Façades*. Dissertação de Doutoramento, University of Nottingham, 2008.
- [118] Hensen, J. L .M., *Literature Review on Thermal Comfort in Trasient Condition*. Building and Environment 25, p. 309-316, 1990.
- [119] Toftum, J., Nielsen, R., *Draught sensitivity is influenced by general thermal sensation*. International Journal of Industrial Ergonomics 18, p. 295-305, 1996.
- [120] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y., *An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response*. ASHRAE Transactions 77, p. 247-262, 1971.
- [121] Fountain, M. E., Huizenga, C., *A thermal sensation prediction software tool for use by the profession (RP-781)*. ASHRAE Transactions 103, Part 2, p. 130-136, 1997.
- [122] Engineering ToolBox: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html). Consultado em setembro de 2015.
- [123] Boxcar Software for HOBO Data Logger. *Pacific Gas and Electric Company*, Pacific Energy Center, [www.pge.com/pec](http://www.pge.com/pec).
- [124] Hobo H08-003. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/h08-003-02>. Consultado em setembro de 2011.
- [125] La Crosse. *Estação Meteorológica*. <https://www.lacrossetechnology.com/308-2316/>. Consultado em junho de 2012.
- [126] Mikromec® Multisens da empresa Technics. <http://www.technetics.de/datenlogger.htm>. Consultado em setembro de 2010.

- [127] Babuc ABC. *Estação Microclimática*. LSI – LASTEM. *Esperti delle misure tecnologiche ambientali*, [http://www.lsi-lastem.it/webdocument/instum\\_00064\\_en.pdf](http://www.lsi-lastem.it/webdocument/instum_00064_en.pdf). Consultado em setembro de 2011.
- [128] Fluke 975. <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/hvac-iaq-tools/air-testers/fluke-975.htm?PID=56156>. Consultado em setembro de 2011.
- [129] Hobo U12-012. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012>. Consultado em setembro de 2011.
- [130] CAM E300. <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=41372>. Consultado em julho de 2012.
- [131] ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2004.
- [132] EN 12 464-1 - *Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2007.
- [133] ANSI/ASHRAE Standard 90.1 – *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.
- [134] Miguel, A. et al, *Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt Area*, Solar Energy 70, p. 143 – 153, 2001.
- [135] EnergyPlus Energy Simulation Software, Weather Data: Portugal ([http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=6\\_europe\\_wmo\\_region\\_6/country=PRT/cname=Portugal](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal)). Consultado em fevereiro de 2012.
- [136] Oliveira, A. M. F., Corvacho, M. H. P., *Vãos Envidraçados, Desempenho Térmico e Conforto Térmico Humano – Modelo Simplificado de Seleção*, Revista Internacional TECH ITT by Construlink, Estruturas e Construção Vol. 11 Número 34, p. 12-21, 2013.
- [137] Oliveira, A. M. F., Corvacho, M. H. P., *Vãos Envidraçados, Desempenho Térmico e Conforto Térmico Humano – Modelo Simplificado de Seleção*, Atas do Congresso Construção 2012, Coimbra.
- [138] Almeida, Ricardo M. S. F., Freitas, V.P., *Evaluation and Parametric Optimization of the Heating load and Comfort Conditions in a School Building*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Tampere, Finland 29 de maio a 2 de junho de 2011.
- [139] Deb, K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [140] MATLAB, 2006. User's Guide. *The MathWorks*, 2006.
- [141] QlikTech International AB, *QlikView Reference Manual. Version 11.2 SR11 for Microsoft Windows*. Lund, Sweden, 2015. (<http://www.qlik.com/us/products/qlikview>). Consultado em junho de 2015.
- [142] Brooke, A., et al, *GAMS a User's Guide*. New York: GAMS Development Corporation, 1998.

# Anexo A

## MÉTODO BEStest

### A.1. – MÉTODO BESTEST

O método BEStest (*Building Energy Simulation test*), promovido pela IAE (*International Energy Agency*) surgiu devido à dificuldade de validar programas de simulação [26]. Com o método BEStest da norma americana ASHRAE Standard 140-2007 pode-se simular diferentes modelos no programa utilizado, por um lado, serve como treino e por outro lado para validar o programa. A estimativa do que se pretende simular calculada pelo programa é comparada com resultados de outros programas citados na norma.

Segundo a ASHRAE Standard 140-2007 [26], para que seja feita a validação de um programa de simulação térmica de edificações é necessário que este passe por pelo menos um dos três métodos:

- a) o método da Verificação Analítica, que consiste em comparar os dados de saída de um programa, de uma sub-rotina, ou de um algoritmo ao resultado de uma solução analítica conhecida;
- b) o método da Validação Empírica, que consiste em comparar resultados calculados de um programa, sub-rotina, ou algoritmo aos dados monitorados de uma estrutura, de uma célula, ou de uma experiência de laboratório;
- c) o Teste Comparativo, que consiste em comparar os resultados com outros programas ou versões diferentes de um mesmo programa.

O método BEStest, adoptado pela ASHRAE Standard 140, utiliza o Teste Comparativo para a validação de um programa. O princípio básico do método BEStest consiste em avaliar 40 (quarenta) casos distribuídos em quatro grupos de simulação, são eles:

- *Low Mass* (construções leves);
- *High Mass* (construções pesadas);
- *Free-Float* (sem sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento do ar);
- *In-Depth* (análise mais aprofundada do comportamento térmico do edifício).

Cada caso é caracterizado pela principal variável analisada. As variáveis testadas são:

- o tipo de elemento construtivo do edifício (leve ou pesado);
- presença ou não de condicionamento de ar;
- aquecimento por radiação solar directa;
- sombreamento nas janelas;
- orientação das aberturas;
- efeito do solo;
- efeito da ventilação;

- programação e ajuste da temperatura de controle de aquecimento e resfriamento;
- presença ou não de taxa de infiltração;
- ganhos de calor interno.

Os quadros seguintes descrevem os quatro grupos de modelos listados no método BEStest.

Quadro A.1. – Casos da ASHRAE Standard 140 - *Low Mass* (construções leves)

Casos	Caraterística Principal
600	Edificação com duas janelas na fachada sul.
610	Edificação com duas janelas na fachada sul com protecção solar.
620	Edificação com uma janela na fachada leste e outra na fachada oeste.
630	Edificação com uma janela na fachada leste e outra na fachada oeste, ambas com protecção solar.
640	Ajuste da temperatura de controle de aquecimento para 10 °C entre 7h e 23h.
650	Ventilação nocturna.

Quadro A.2. – Casos da ASHRAE Standard 140 - *High Mass* (construções pesadas)

Casos	Caraterística Principal
900	Igual ao caso 600 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
910	Igual ao caso 610 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
920	Igual ao caso 620 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
930	Igual ao caso 630 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
940	Igual ao caso 640 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
950	Igual ao caso 650 excepto que as paredes e o piso são substituídos por outros de densidades mais elevadas.
960	Igual ao caso 600 excepto pelo acréscimo de uma zona “ensolarada” na fachada sul com materiais de densidade mais elevada e isenta de sistemas de aquecimento e resfriamento.

Quadro A.3. – Casos da ASHRAE Standard 140 - *Free-Float* (sem sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento do ar)

Casos	Caraterística Principal
600FF	Igual ao caso 600 excepto pela exclusão dos sistemas de aquecimento e arrefecimento do edifício.
650FF	Igual ao caso 650 excepto pela exclusão dos sistemas de aquecimento e arrefecimento do edifício.
900FF	Igual ao caso 900 excepto pela exclusão dos sistemas de aquecimento e arrefecimento do edifício.
950FF	Igual ao caso 950 excepto pela exclusão dos sistemas de aquecimento e arrefecimento do edifício.

Quadro A.4. – Casos da ASHRAE Standard 140 - *In-Depth* (análise mais aprofundada do comportamento térmico do edifício)

Casos	Caraterística Principal
220	Igual ao caso 600 excepto pela substituição das janelas por uma parede de alta condutância com uma câmara-de-ar, baixa absorção solar dos materiais voltados para o exterior do edifício, taxa de infiltração e ganhos internos nulos.
210	Igual ao caso 220 excepto que os materiais voltados para o interior do edifício têm absorção térmica mais baixa.
215	Igual ao caso 220 excepto que os materiais voltados para o exterior do edifício têm absorção térmica mais baixa.
200	Igual ao caso 210, porém a absorção térmica dos materiais voltados para o exterior do edifício também



	é mais baixa.
195	Igual ao caso 200 excepto que a parede de alta condutância é substituída por paredes leves.
230	Igual ao caso 220 excepto que a taxa de infiltração passou de zero para 0,036 m <sup>3</sup> /s.
240	Igual ao caso 220 excepto que a fonte de calor interna passou de zero para 200 W.
250	Igual ao caso 220 excepto que os materiais voltados para o exterior do edifício possuem absorção solar mais elevada.
270	Igual ao caso 220 excepto que os materiais voltados para o interior do edifício possuem absorção solar mais elevada e as paredes de alta condutância foram substituídas pelas janelas originais (do caso 600).
280	Igual ao caso 270 excepto que a absorção solar dos materiais voltados para o interior do edifício é mais baixa.
290	Igual ao caso 270 excepto que foi acrescentado uma protecção solar nas janelas.
300	Igual ao caso 270 excepto que foram substituídas as duas janelas da fachada sul por uma janela na fachada leste e outra na fachada oeste.
310	Igual ao caso 300 excepto pelo acréscimo de protecções solares nas janelas.
320	Igual ao caso 270 excepto pelo ajuste do termóstato, passando a accionar o resfriamento acima de 27 °C e o aquecimento abaixo de 20 °C.
400	Igual ao caso 600 excepto pela substituição das janelas por uma parede de alta condutância com uma caixa-de-ar, baixa absorção solar dos materiais voltados para o exterior do edifício, taxa de infiltração e ganhos internos nulos.
395	Igual ao caso 400 excepto que a parede de alta condutância é substituída por paredes leves.
410	Igual ao caso 400 excepto que a taxa de infiltração passou de zero para 0,018 m <sup>3</sup> /s.
420	Igual ao caso 410 excepto que os ganhos internos passaram de zero para 200 W.
430	Igual ao caso 420 excepto pelo aumento da absorção à radiação em ondas curtas dos materiais voltados para o exterior do edifício.
440	Igual ao caso 600 excepto pela diminuição da absorção à radiação em ondas curtas dos materiais voltados para o interior do edifício.
800	Igual ao caso 430 excepto que se substituem os materiais leves ( <i>low mass</i> ) das paredes e do piso por materiais pesados ( <i>high mass</i> ).
810	Igual ao caso 900 excepto pela diminuição da absorção à radiação em ondas curtas dos materiais voltados para o interior do edifício.

#### A.1.1. DESCRIÇÃO DO CASO BESTEST – 900FF

É apresentado a seguir o modelo geométrico do caso escolhido e as suas principais características, fornecidos pela ASHRAE Standard 140 [9]:

- dimensões: 8,00 m x 6,00 m x 2,70 m, sem divisões interiores;
- envidraçados: 2 x (3,00 m x 2,00 m), orientados a Sul;
- localização: Denver (Colorado – USA), altitude de 1,609 m, latitude de 39,8 °Norte, longitude de 104,9 °Oeste. O arquivo climático para uso na simulação, em formato TMY (*Typical Meteorological Year*), é fornecido juntamente com a norma;
- terreno: plano, sem obstáculos e situado exactamente na estação meteorológica;
- infiltrações: 0,5 Rph;
- ganhos internos: 200 W contínuos, 60% radiativo, 40% convectivo, 100% sensível.

Na figura A.1 está apresentado o modelo geométrico do caso 900FF.

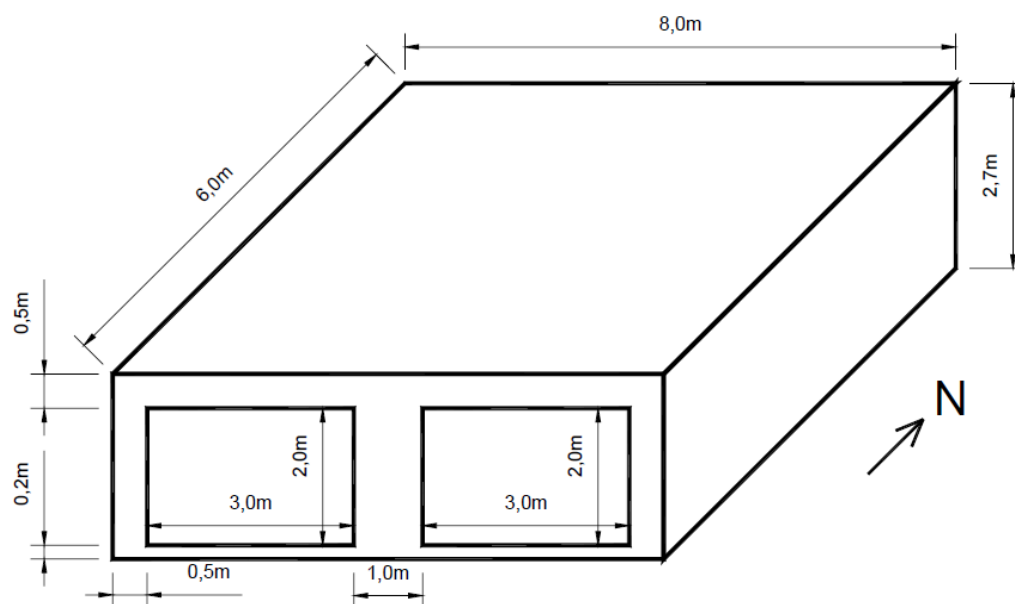


Fig.A.1. – Modelo geométrico do caso 900FF

Nos quadros seguintes apresenta-se para cada elemento os materiais e as suas propriedades. A ordem de apresentação dos materiais é igual à ordem como são introduzidos no programa de simulação, do exterior para o interior do modelo geométrico:

Quadro A.5. – Materiais - Propriedades dos envidraçados

Propriedades do envidraçado	
Coeficiente de extinção	0,0196/mm
Número de vidros	2
Espessura do vidro	3,175 mm
Espaço de ar entre vidros	13 mm
Índice de refração	1,526
Transmissão Normal da Radiação Directa através do vidro	0,86156
Condutibilidade Térmica do vidro	1,06 W/m.°C
Condutância de cada vidro	1,06 W/m <sup>2</sup> .°C
Coeficiente Combinado de Transferência por Radiação e Convecção da Caixa-de-Ar	6,297 W/m <sup>2</sup> .°C
Coeficiente de Transmissão Térmica Exterior Combinado	21,00 W/m <sup>2</sup> .°C
Coeficiente de Transmissão Térmica Interior Combinado	8,29 W/m <sup>2</sup> .°C
<i>U</i> – Coeficiente de Transmissão Térmica	3,00 W/m <sup>2</sup> .°C
Emitância do vidro	0,90
Densidade do vidro	2500 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	750 J/kg.°C
Dispositivo de Sombreamento Interior	nenhum
Sombreamento do vidro duplo para Incidência Normal	0,907
Factor Solar do vidro	0,789

São necessárias propriedades adicionais para as duas faces do vidro. Foram recomendados pelo LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*) [23] outros dados para o envidraçado anterior, descrito na ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 [9].

Quadro A.6. – Materiais - Constituição das paredes

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Revestimento de madeira	0,140	0,009	15,556	0,064	530	900
2	Isolamento térmico	0,040	0,0615	0,606	1,537	10	1400
3	Alvenaria de blocos de betão	0,510	0,100	5,100	0,196	1400	1000
Total				0,512	1,952		

Quadro A.7. – Materiais - Constituição do pavimento

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Isolamento térmico	0,040	1,007	0,400	25,175	10	1400
2	Laje de betão armado	1,130	0,080	14,125	0,071	1400	1000
Total				0,039	25,366		

Quadro A.8. – Materiais - Constituição do teto

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Revestimento de madeira	0,140	0,019	7,368	1,136	530	900
2	Isolamento térmico	0,040	0,118	0,358	2,794	12	840
3	Placas de gesso cartonado	0,160	0,010	16,000	0,063	950	840
Total				0,318	3,147		

## A.1.2. INTRODUÇÃO DOS DADOS NO PROGRAMA DESIGNBUILDER

A simulação do caso 900FF serve para apresentar e explicar os campos presentes no programa e permitir mostrar como os dados têm que ser preenchidos, tentando justificar as opções tomadas.

Podemos também consultar e editar e actualizar a base de dados dos componentes “*Component Libraries*” e dos exemplos “*Templates Libraries*”.

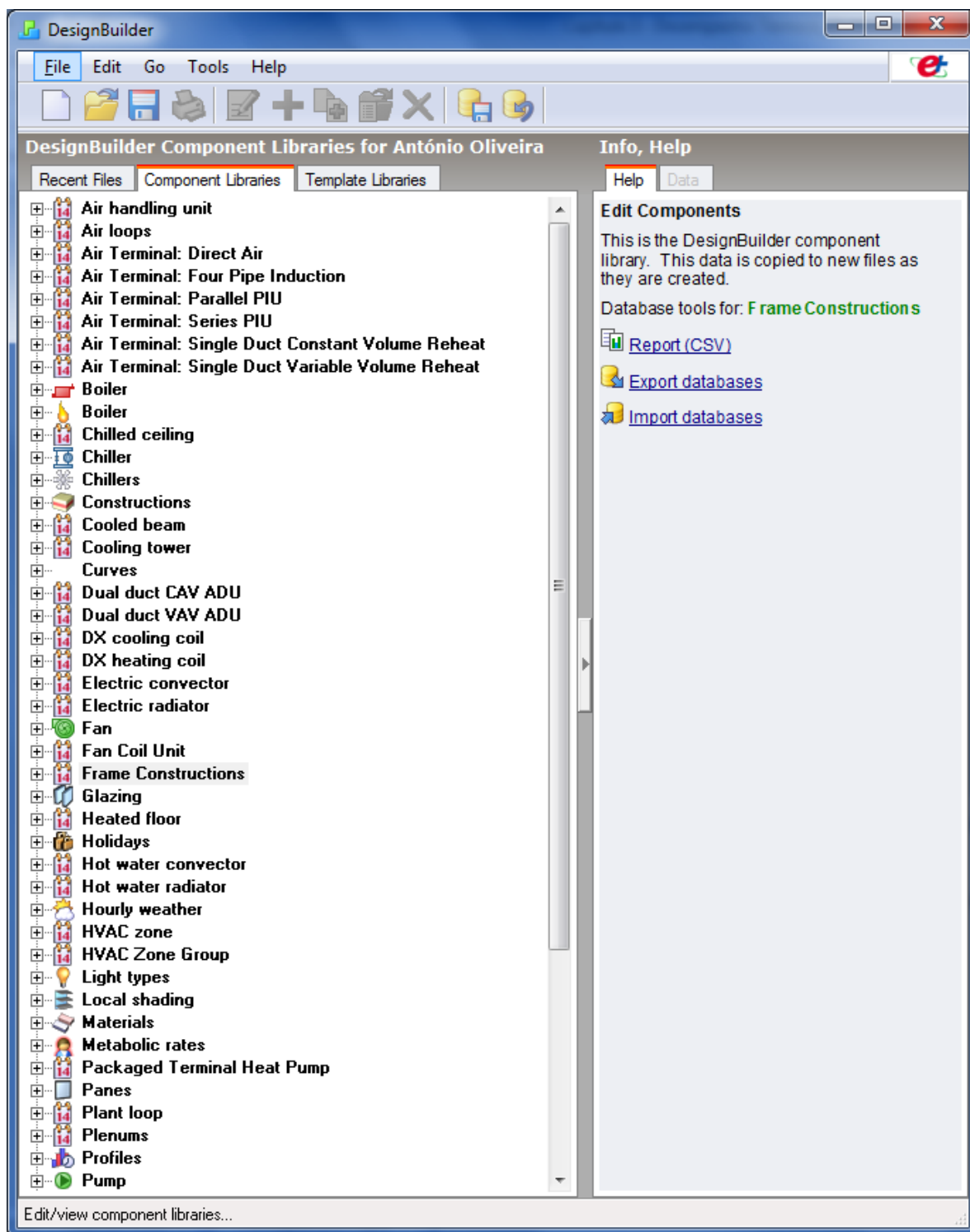


Fig.A.2. – DesignBuilder – Base de dados dos componentes

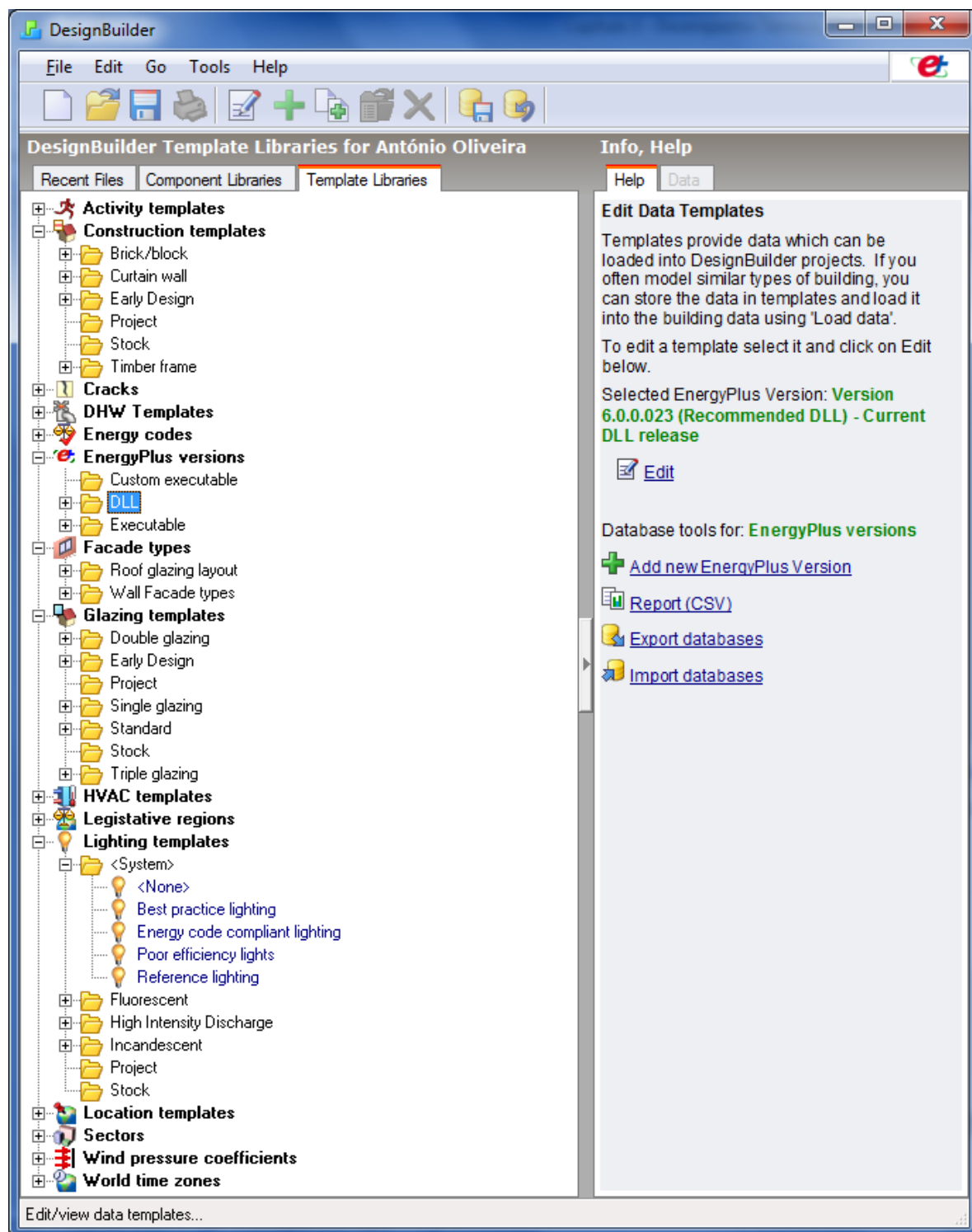


Fig.A.3. – DesignBuilder – Base de dados dos exemplos

Neste caso vamos criar um novo Projeto (*New Project*) denominado “Caso\_900FF”. Podemos começar por inserir os materiais e elementos de construção definidos na ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, antes de criar o novo Projeto “Caso\_900FF”, ficando estes disponíveis na base de dados (Componet Libraries) para futuras utilizações.

### A.1.2.1. Construção dos Elemento Construtivo

Em primeiro lugar temos que inserir as propriedades dos materiais que constituem o elemento construtivo em “*Component Libraries - Materials*” e em seguida construir o elemento construtivo em “*Component Libraries - Constructions*”, camada a camada do elemento exterior para o interior. As figuras seguintes representam os passos necessários para inserir a parede exterior, o mesmo processo tem que ser repetido para todos os elementos da envolvente.

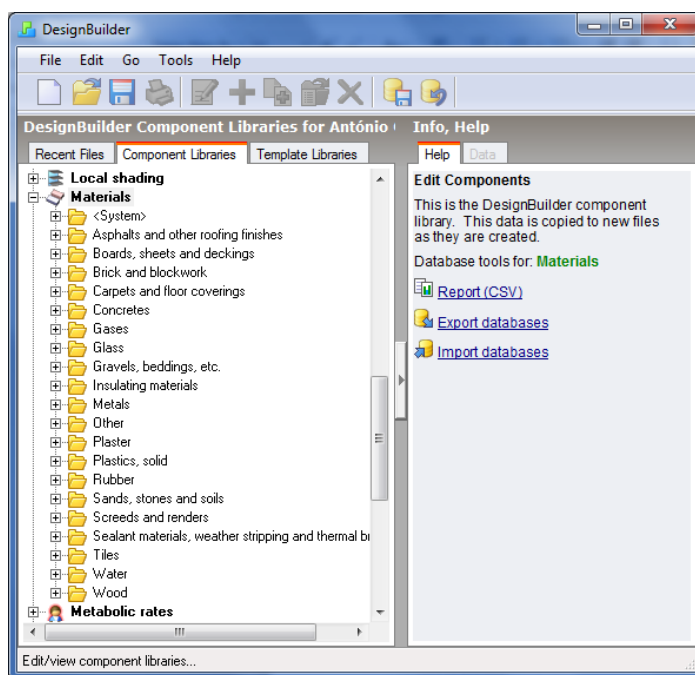


Fig.A.4. – DesignBuilder – *Component Libraries - Materials*

Introdução das camadas da Parede.

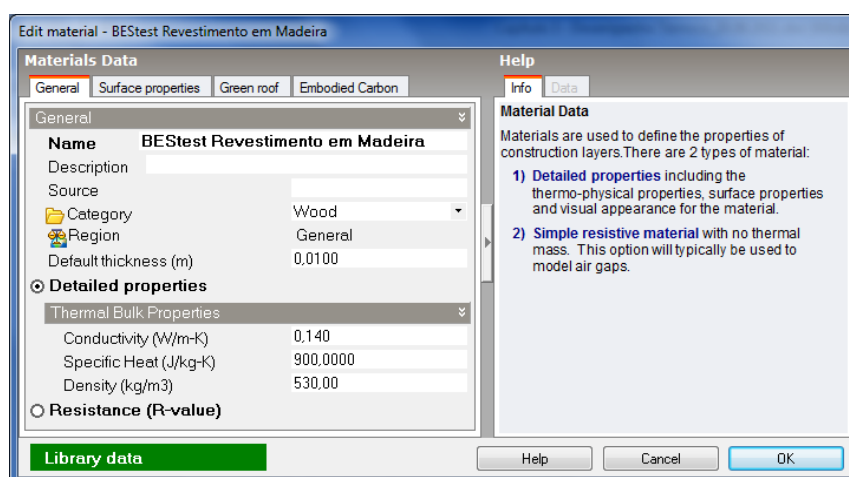


Fig.A.5. – Parede Exterior – Introdução das características gerais relativas à primeira camada

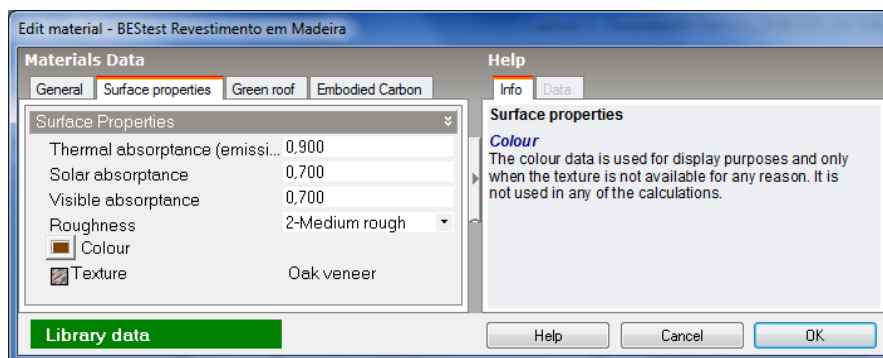


Fig.A.6. – Parede Exterior – Introdução das propriedades das superfícies relativas à primeira camada

Como podemos observar das figuras 3.23 e 3.24 são definidas as características gerais dos materiais relacionados com a condutibilidade, calor específico e densidade. Também são necessárias as características das superfícies relacionadas com a rugosidade e com a absorção da radiação solar e luz, estas características afectam o cálculo da resistência térmica superficial. Mais uma vez, tem que se repetir este processo para todas as camadas que constituem os elementos da envolvente.

A opção “Resistance (*R-value*)” permite definir os materiais em que apenas é conhecida a resistência térmica (*R*) e para todos os materiais que não acumulam calor na massa, os isolantes térmicos, pois estes em regra contribuem muito pouco para a inércia térmica. Na figura 3.24 é apresentada a introdução das características do isolamento térmico indicando apenas a sua resistência térmica.

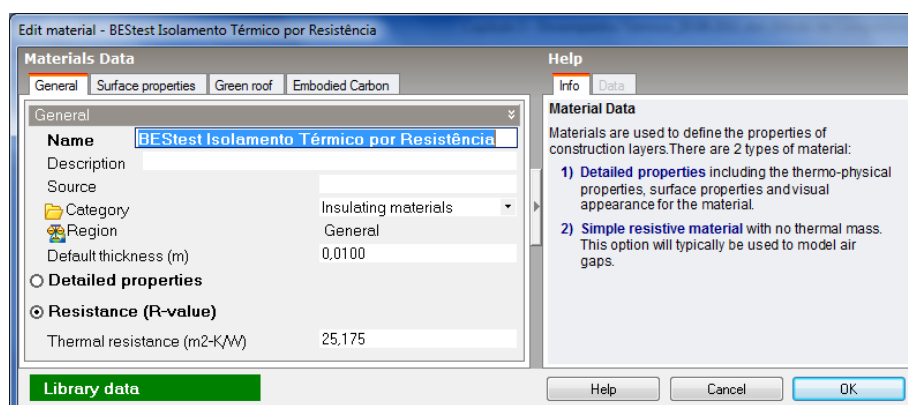


Fig.A.7. – Parede Exterior – Introdução das características do isolamento térmico

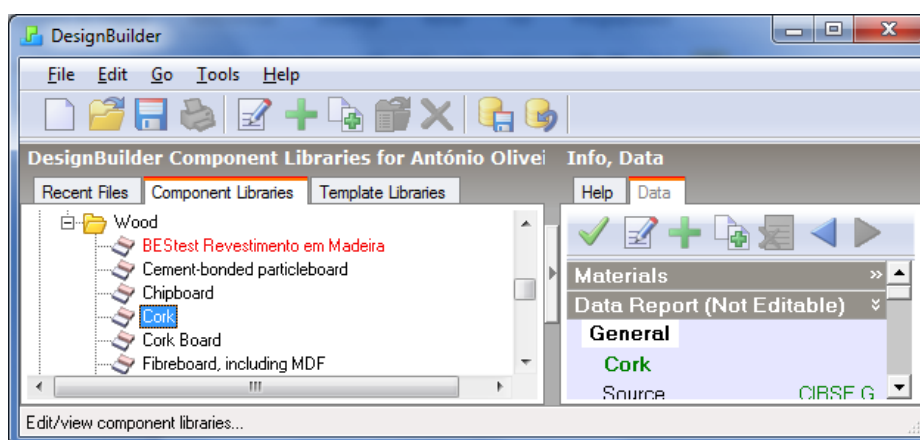


Fig.A.8. – Parede Exterior – Apresentação do material na base de dados. Os elementos acrescentados à base de dados ficam a vermelho

## Construção da Parede.

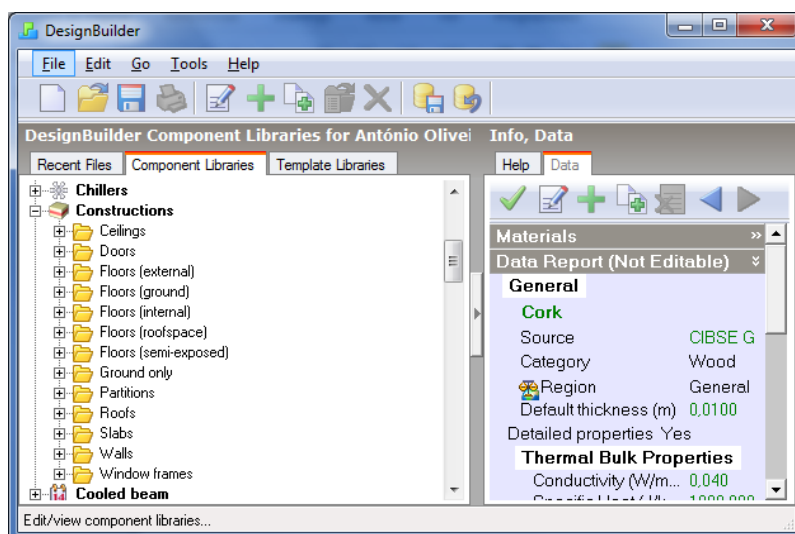


Fig.A.9. – DesignBuilder – *Component Libraries - Constructions*

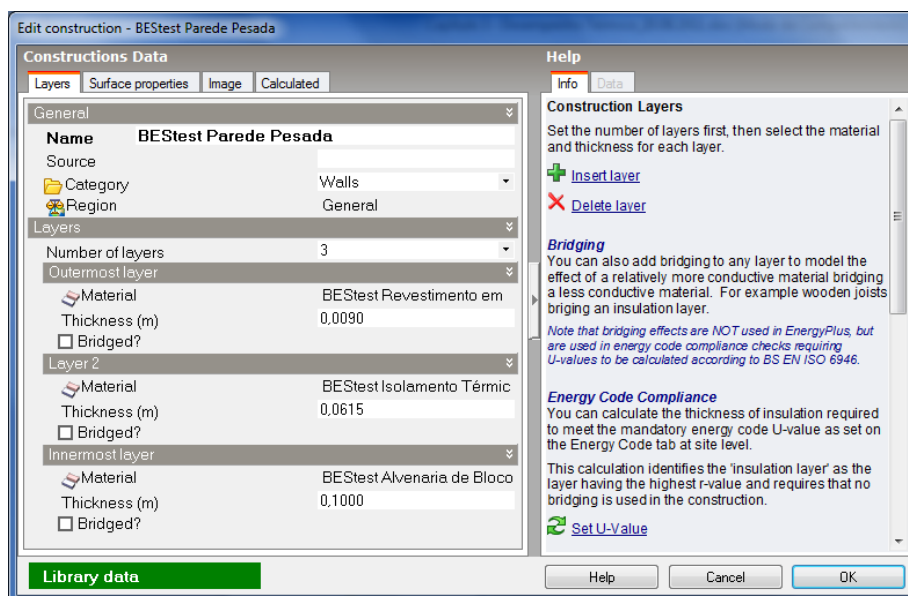
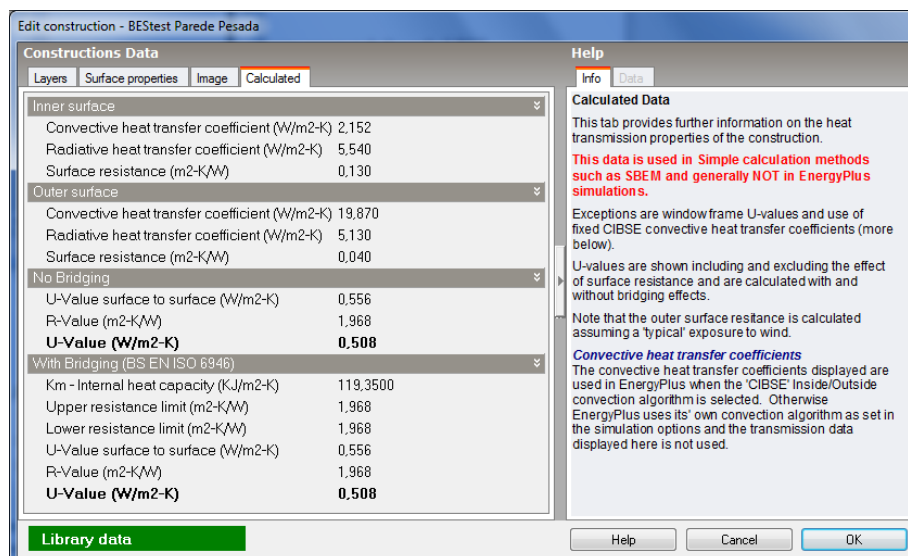


Fig.A.10. – Parede Exterior – Introdução das camadas e respectiva espessura

O programa DesignBuilder permite fazer um cálculo simplificado do valor do coeficiente de transmissão térmica. Na simulação o valor do coeficiente de transmissão térmica varia em função das condições a que as superfícies estão sujeitas. A temperatura do Ar, radiação solar, etc, têm influencia nas resistências térmicas superficiais interior e exterior.




Fig.A.11. – Parede Exterior – Cálculo do  $U$  da parede

### A.1.2.2. Definição dos Envidraçados

Em primeiro lugar temos que inserir as propriedades dos materiais que constituem o elemento construtivo em “*Component Libraries – Panes e Window Gas*” e em seguida construir o vidro duplo em “*Component Libraries - Glazin*”, camada a camada do elemento exterior para o interior. As figuras seguintes representam os passos necessários para inserir o vão envidraçado.

#### A - Introdução das propriedades do Vidro.

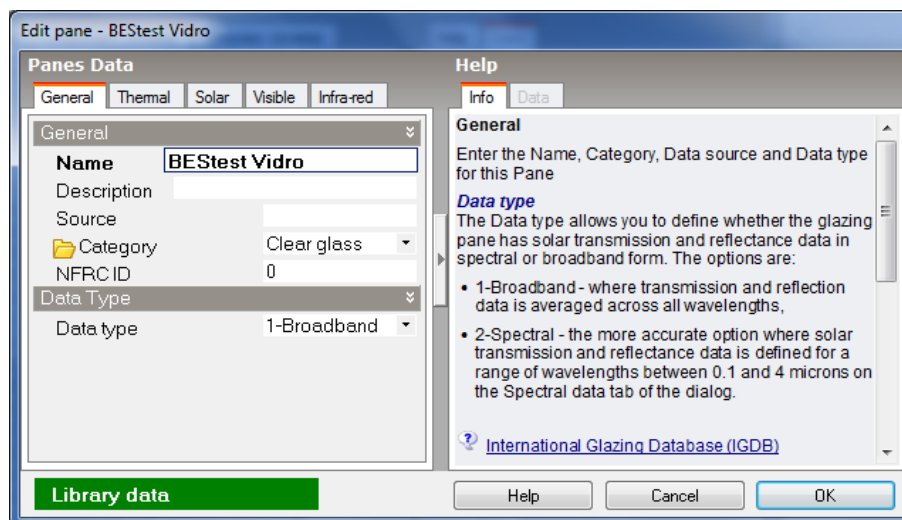


Fig.A.12. – Vão Envidraçado – Propriedades gerais do vidro

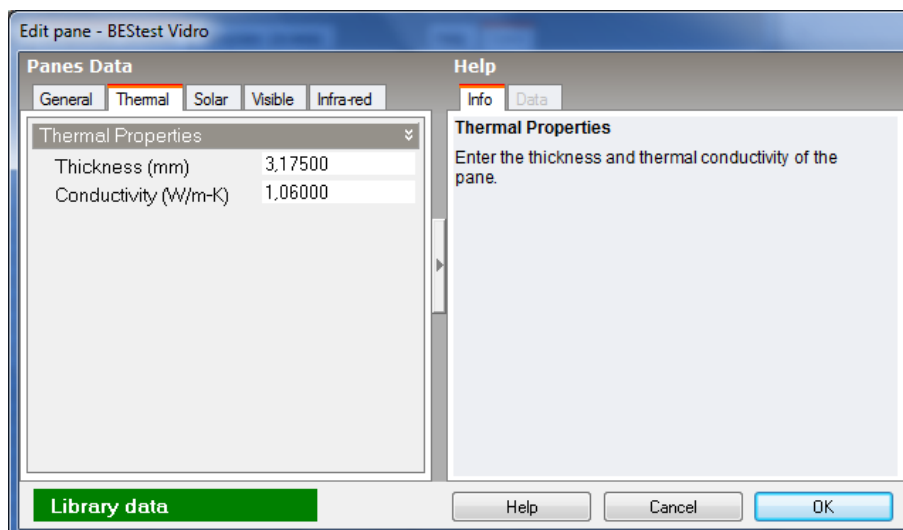


Fig.A.13. – Vão Envidraçado – Propriedades térmicas do vidro

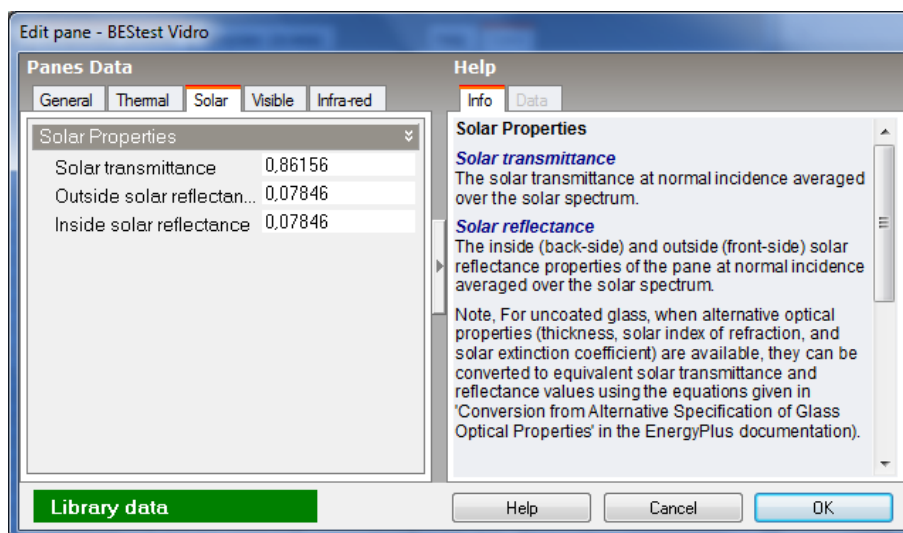


Fig.A.14. – Vão Envidraçado – Propriedades da transmissão solares do vidro

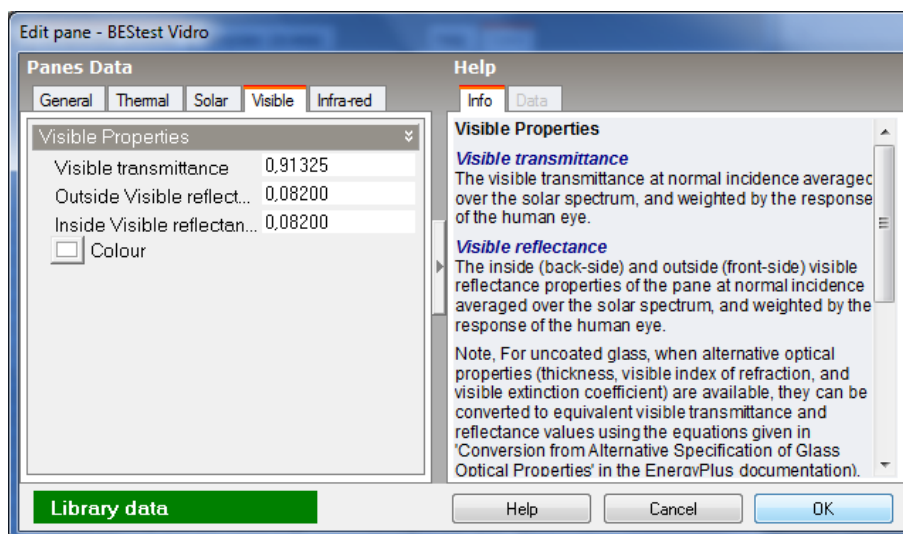


Fig.A.15. – Vão Envidraçado – Propriedades da transmissão da luz do vidro

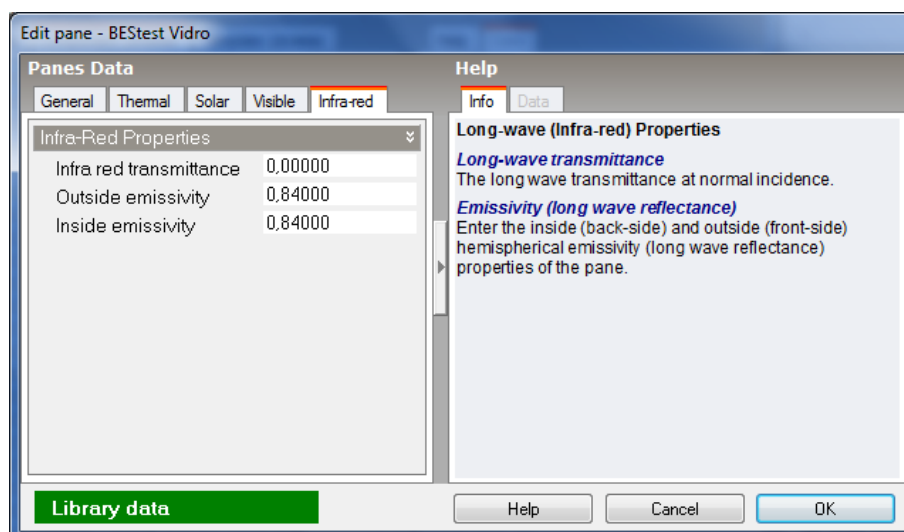


Fig.A.16. – Vão Envidraçado – Propriedades da radiação infravermelha do vidro

B - Introdução das propriedades do Ar que fica entre os vidros.

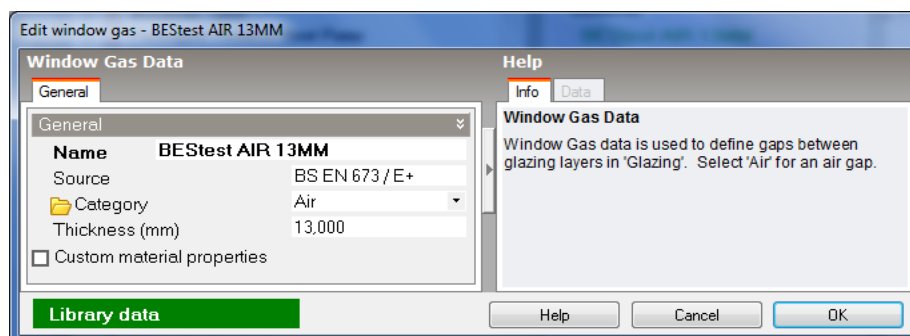


Fig.A.17. – Vão Envidraçado – Propriedades do ar

C - Construção do vão envidraçado (Vidro duplo)

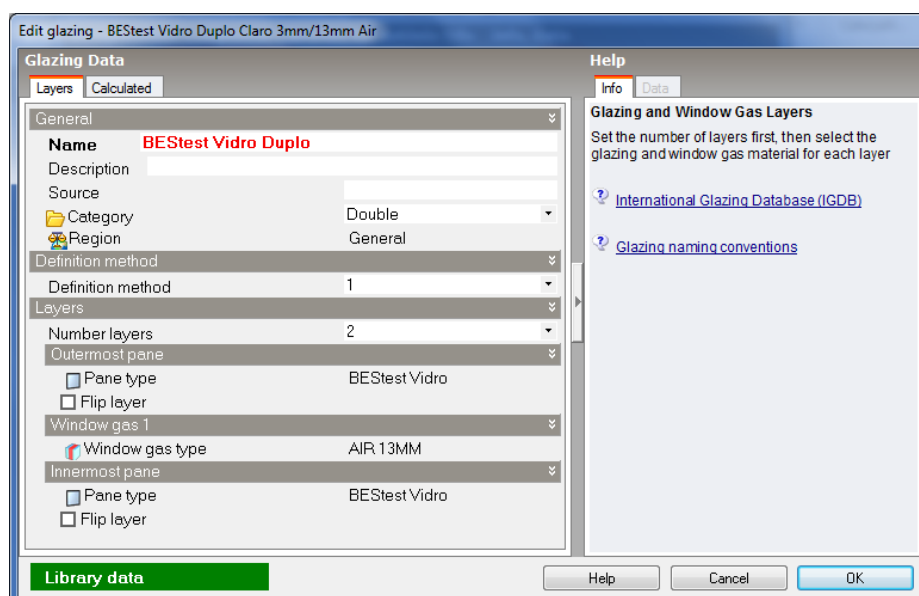
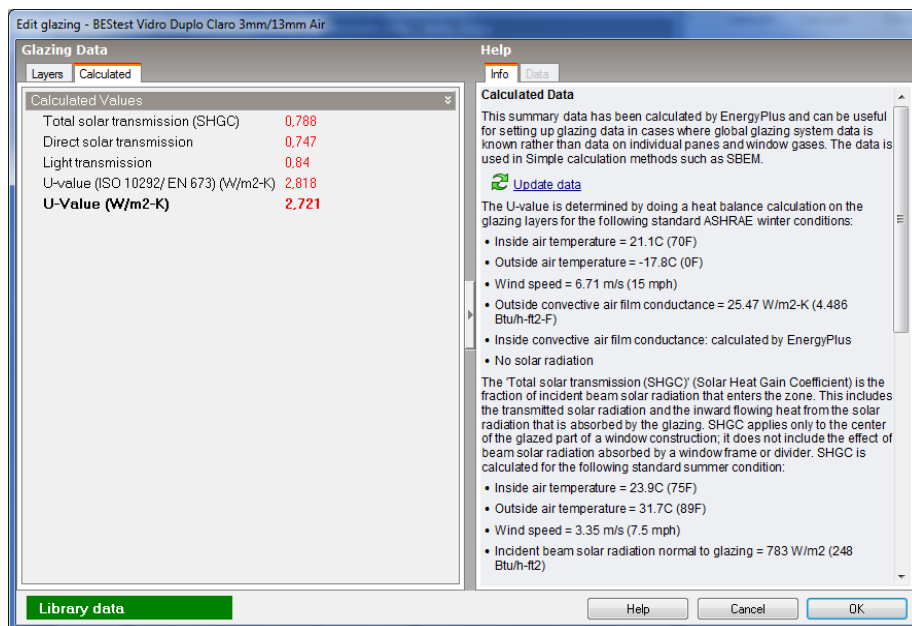
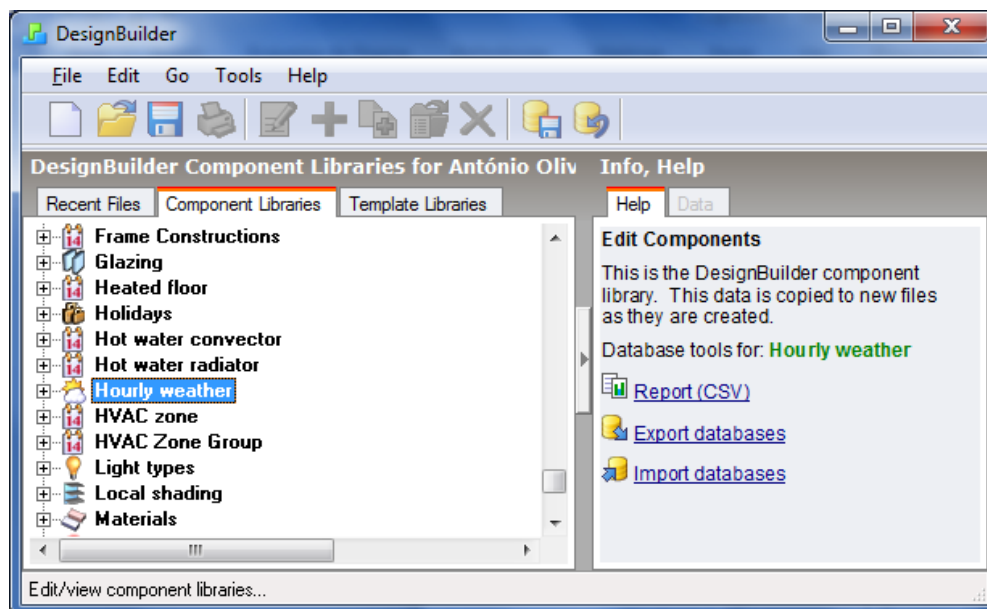


Fig.A.18. – Vão Envidraçado – Introdução das camadas do vidro duplo

Fig.A.19. – Vão Envidraçado – Cálculo do  $U$  do vidro duplo (vidros mais caixa-de-ar)

### A.1.3. DADOS CLIMÁTICOS

Ficheiro com Dados Climáticos (*Weather File*) – Podemos utilizar os que estão na base de dados do programa (*Component Libraries – Hourly weather*) ou inserir um novo ficheiro que pode ter o formato TMY ou IWE.

Fig.A.20. – DesignBuilder – *Component Hourly weather*

Para inserir o Ficheiro Climático “*Hourly weather*” é necessário que o ficheiro tenha uma extensão compatível com o programa.

O ficheiro que se pretende inserir tem a extensão “.epw” (dados climáticos de referencia para a validação do BEStest - Denver no Colorado\_USA). Para os dados serem carregados com sucesso é

ainda necessário converter o ficheiro para criar um ficheiro com os dados estatísticos para a estação de aquecimento e arrefecimento (que o programa cria na barra de ferramentas Tool – *Hourly weather data*) ficheiro com a extensão “.stat”.

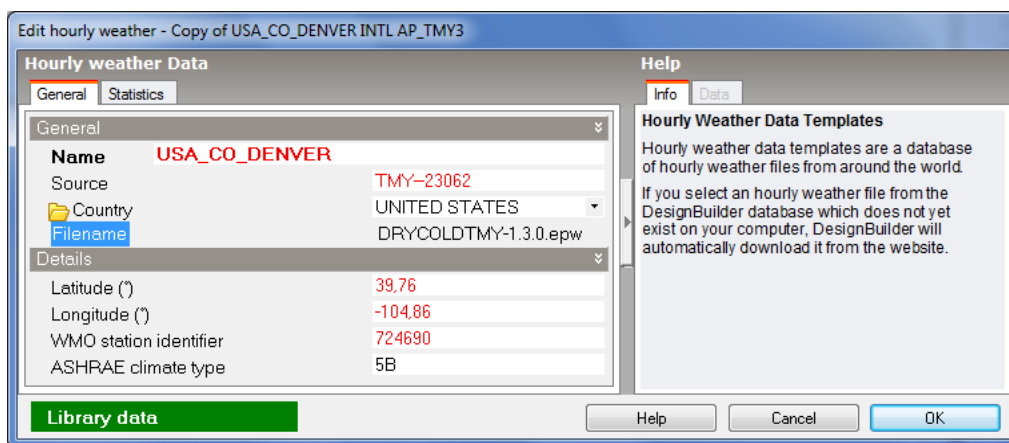


Fig.A.21. – Hourly weather Data – Informações gerais

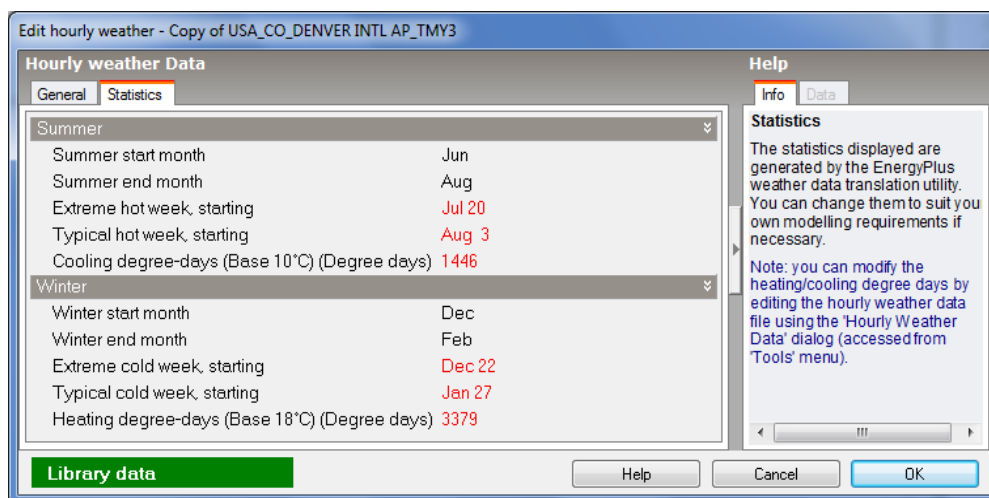


Fig.A.22. – DesignBuilder – Dados estatísticos para a estação de aquecimento e arrefecimento

#### A.1.4. FICHEIRO “NEW PROJECT” CASO\_900FF

Agora vamos criar o ficheiro novo “New Project” Caso\_900FF.

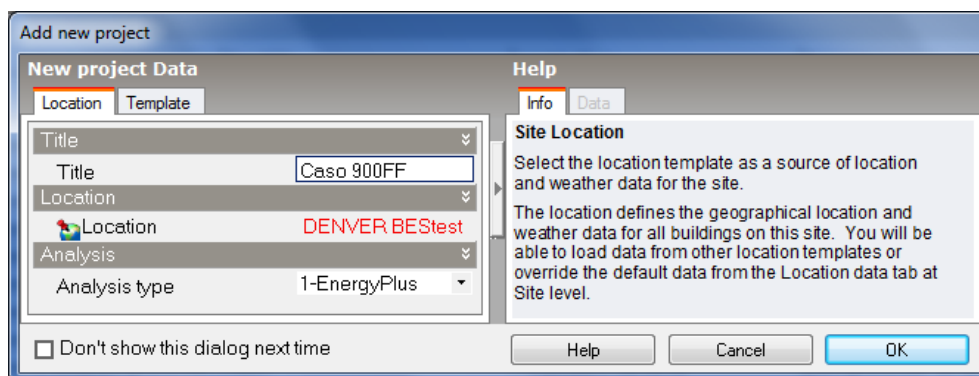


Fig.A.23. – DesignBuilder – Novo Projeto

#### A.1.4.1. Construção do Modelo

Na construção do modelo os dados podem ser inseridos ao nível do edifício, de blocos da zona, da superfície e das aberturas. O conjunto de dados apresentados dependerá do nível na hierarquia (construção civil, blocos, etc.), figura A.24. e sobre as opções de modelo seleccionado.

A construção do modelo de dados é definida nas abas: *Layout*, *Activity*, *Construction*, *Openings*, *Lighting*, *HVAC*, *CFD*. Cada uma destas categorias de dados tem um modelo de seleção na parte superior da Aba que permite o carregamento rápido dos dados do modelo.

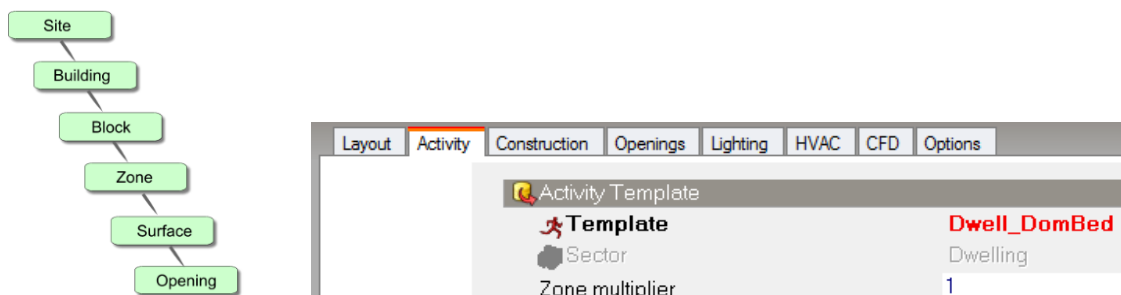


Fig.A.24. – À esquerda os níveis de hierarquia no DesignBuilder, e apresentação das abas para a definição dos dados à direita

Os dados *standard* (que já vêm nas bibliotecas do programa) de cada nível de hierarquia são apresentados a azul enquanto os dados definidos pelo utilizador “*user data*” ou carregados a partir do modelo é mostrado a vermelho, figura A.25. Podemos apagar os dados do utilizador e voltar ao estado inicial.

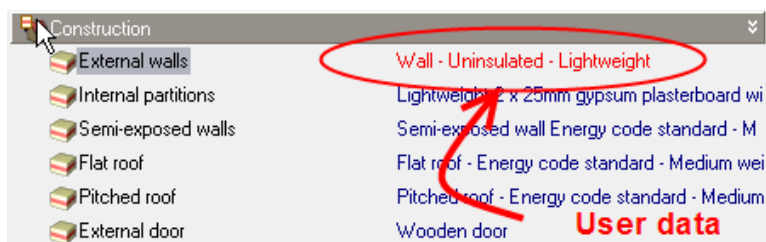


Fig.A.25. – Apresentação dos dados disponíveis

Ao nível do Local “*Site*” – teremos que fazer a caracterização geométrica do edifício em estudo (*Layout*, *Location* e *Region*).

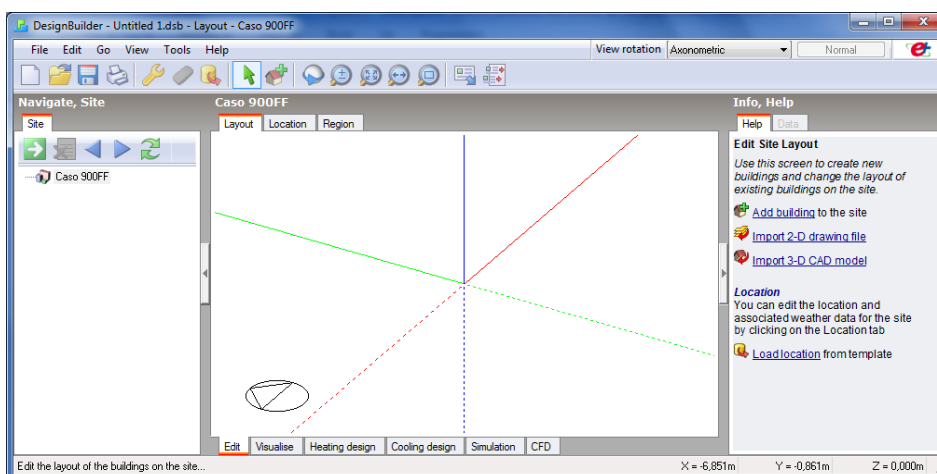


Fig.A.26. – DesignBuilder – Janela gráfica para a construção do Modelo “Layout”



Como podemos observar na figura A.27, no separador “*Location*” no campo “*Site Details*” definisse a orientação do edifício, neste caso o ângulo entre o edifício e o Norte verdadeiro é 0°, e as características do terreno em relação á exposição ao vento, neste caso é considerada a opção “*Exposed*” uma vez que é referido que o edifício se encontra num terreno plano e sem obstáculos. É também no separador “*Location*” que se faz a caracterização do solo. É possível definir a temperatura do solo para cada dia do mês, esta vai ser utilizada em todos os elementos que estão em contacto com o solo, neste caso o pavimento.

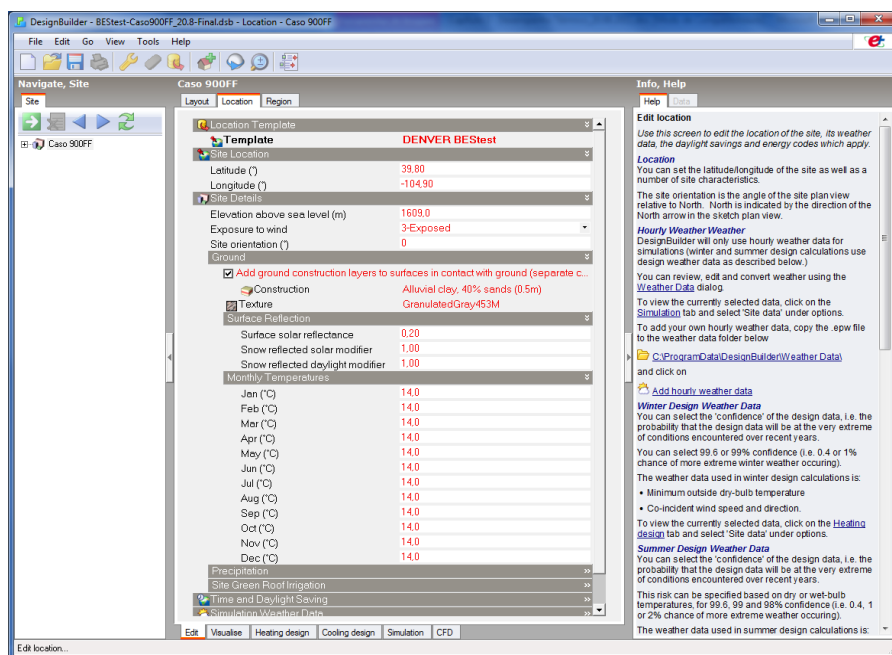


Fig.A.27. – DesignBuilder – Janela gráfica para a construção do Modelo “*Location*”

Para adicionar um novo edifício no separador “*Layout*” clicamos em “*Add a new building*” na zona de “*Info, Help*” à direita no ecrã. No campo “*Drawing Options*” aparece depois de clicarmos em “*Add block*” na zona de “*Info, Help*” à direita no ecrã, define-se a forma como é introduzida a geometria do edifício.

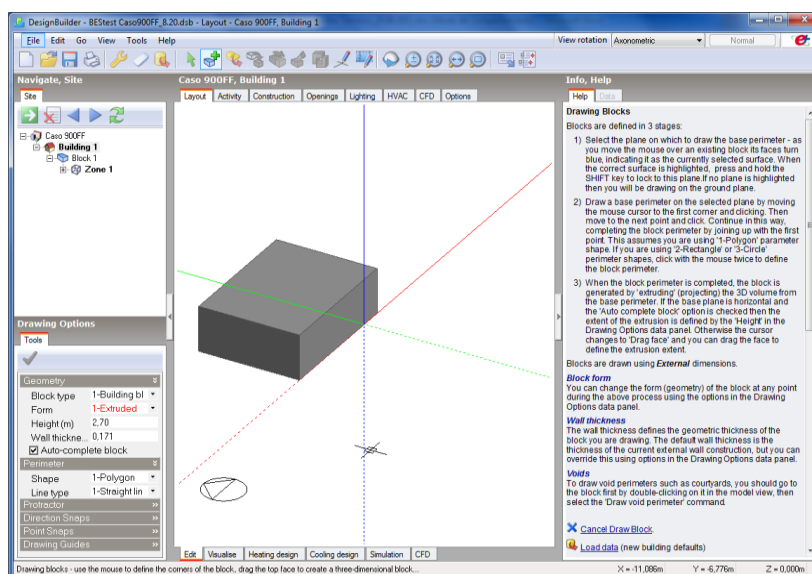


Fig.A.28. – DesignBuilder – Adicionar um novo edifício “*Layout*”

Para adicionar as janelas na parede Sul do bloco criado, no separador “*Layout*” teremos que seleccionar a parede “Wall – 180°”, depois de ajustar a parede, clicamos em “*Draw window*” na zona de “*Info, Help*” à direita no ecrã e seguimos as orientações para o modelo geométrico.

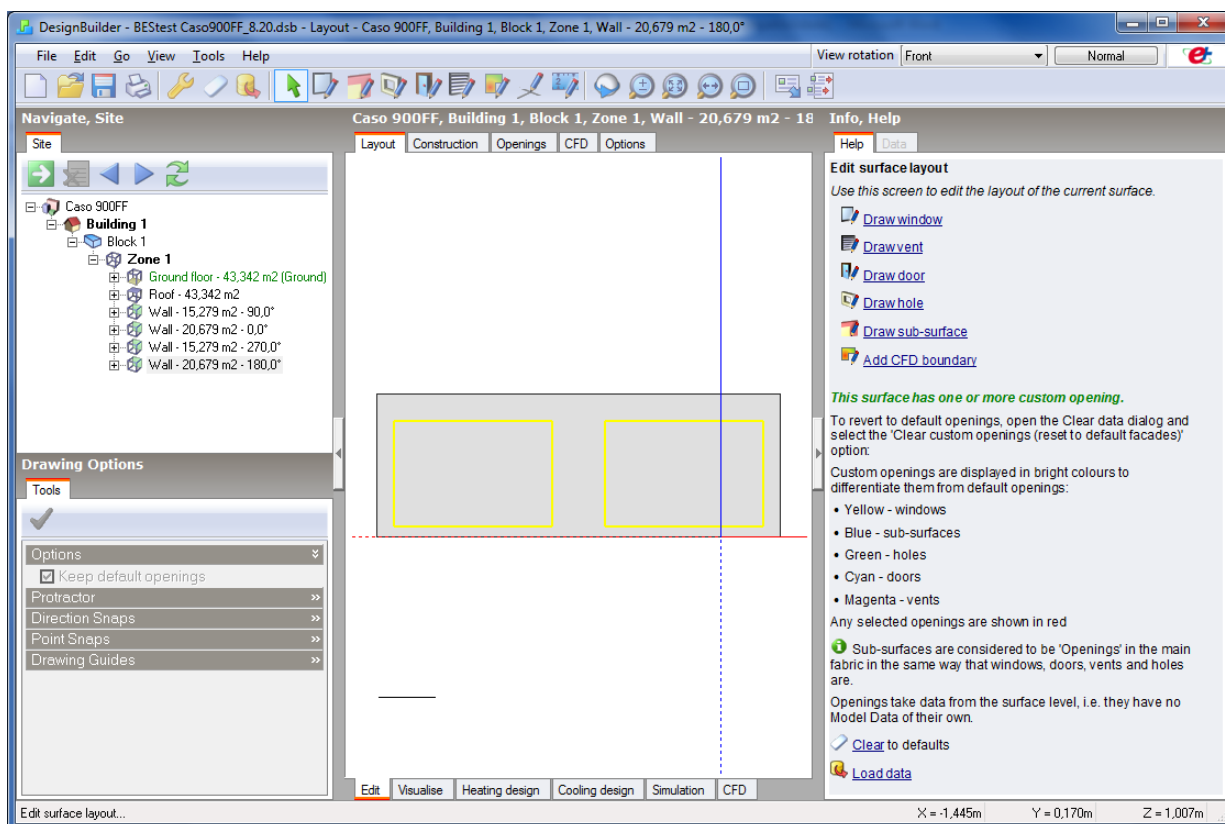


Fig.A.29. – DesignBuilder – Adicionar as janelas ao bloco “*Layout*”

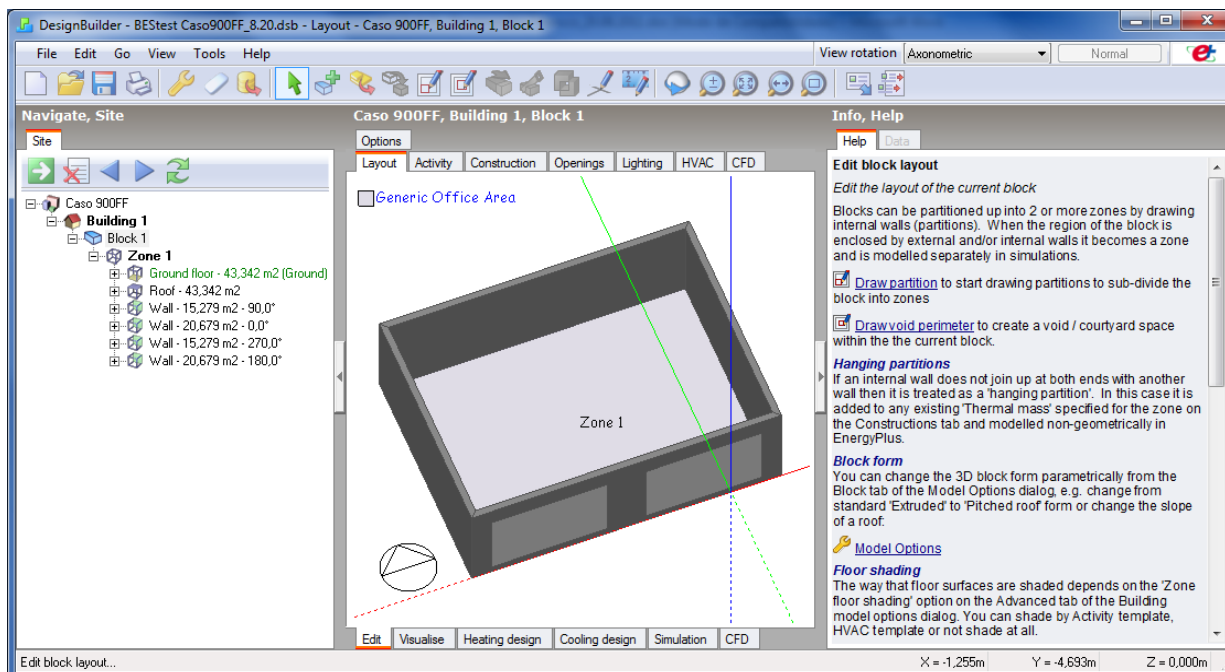


Fig.A.30. – DesignBuilder – Edifício Adicionado



#### A.1.4.2. Definição dos Parâmetros do Edifício

Após a construção do Modelo temos que definir os seguintes parâmetros (*Activity*, *Construction*, *Openings*, *Lighting*, *HVAC* e *Options*). Os dados relativos à actividade (*Activity*), aos elementos construtivos da envolvente opaca (*Construction*), às aberturas (*Openings*) e aos sistemas de iluminação (*Lighting*) e AVAC (*HVAC*), podem ser definidos ao nível dos edifícios, do bloco e da zona. Já os elementos construtivos e as aberturas podem também ser definidos ao nível da superfície.

##### A - Definição do tipo de ocupação dos espaços ou zonas (*Activity*).

Na norma é referida a existência de ganhos internos de 200 W. No presente caso, definimos os ganhos internos no campo “*Miscellaneous*”.

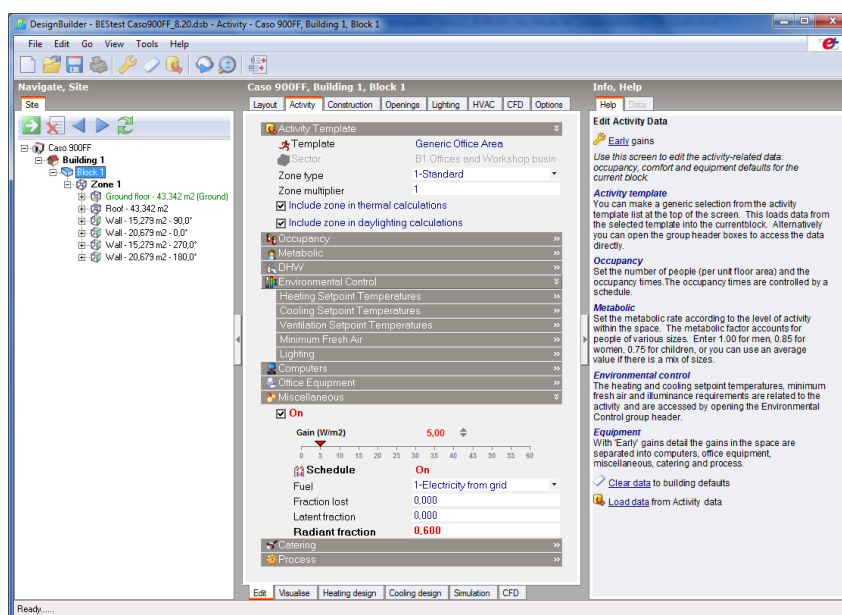


Fig.A.31. – DesignBuilder – Definição do tipo de ocupação dos espaços ou zonas (*Activity*)

##### B - Definição dos elementos da envolvente opaca (*Construction*).

Parâmetros relacionados com a constituição da envolvente opaca e taxa de infiltração, atribuir aos elementos da envolvente as características anteriormente definidas na base de dados do programa (*Component Libraries*).

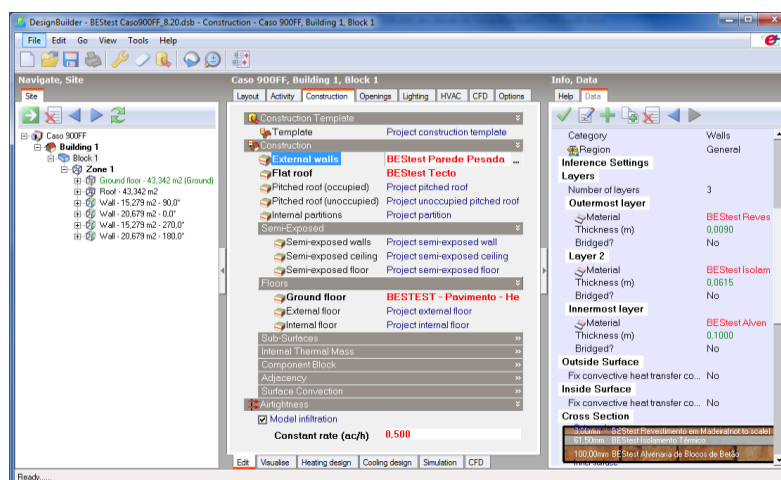


Fig.A.32. – DesignBuilder – Definição dos elementos da envolvente opaca (*Construction*)

### C - Definição dos elementos da envolvente envidraçada (*Openings*).

Parâmetros relacionados com a constituição da envolvente envidraçada, atribuir às janelas as características anteriormente definidas na base de dados do programa (*Component Libraries*).

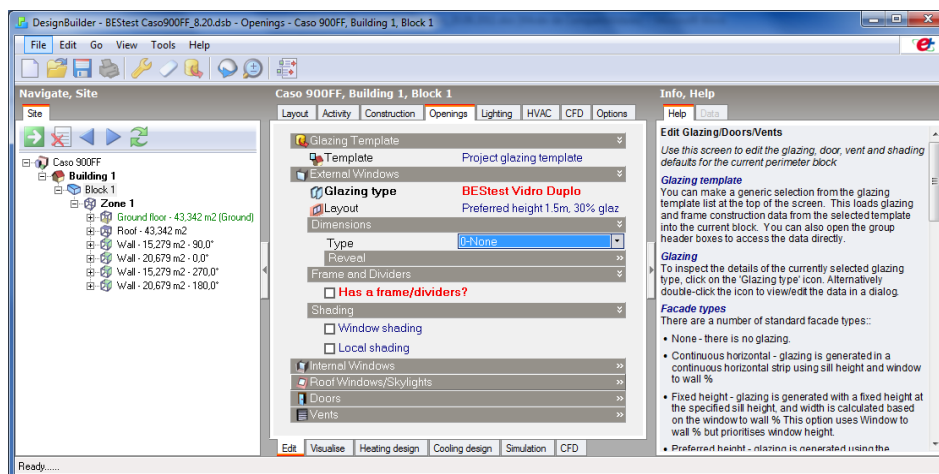


Fig.A.33. – DesignBuilder – Definição dos elementos da envolvente envidraçada (*Openings*)

### D - Definição do sistema de iluminação (*Lighting*).

Na norma nada é referido sobre a ocupação, adoptou-se por considerar que não tinha iluminação.

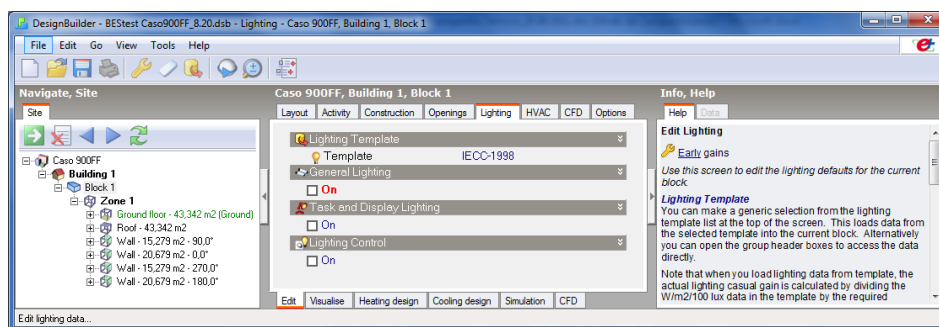


Fig.A.34. – DesignBuilder – Definição do sistema de iluminação (*Lighting*)

### E - Definição do sistema de climatização (*HVAC*).

Na norma nada é referido sobre a ocupação, adoptou-se por considerar que não tem sistemas de climatização.

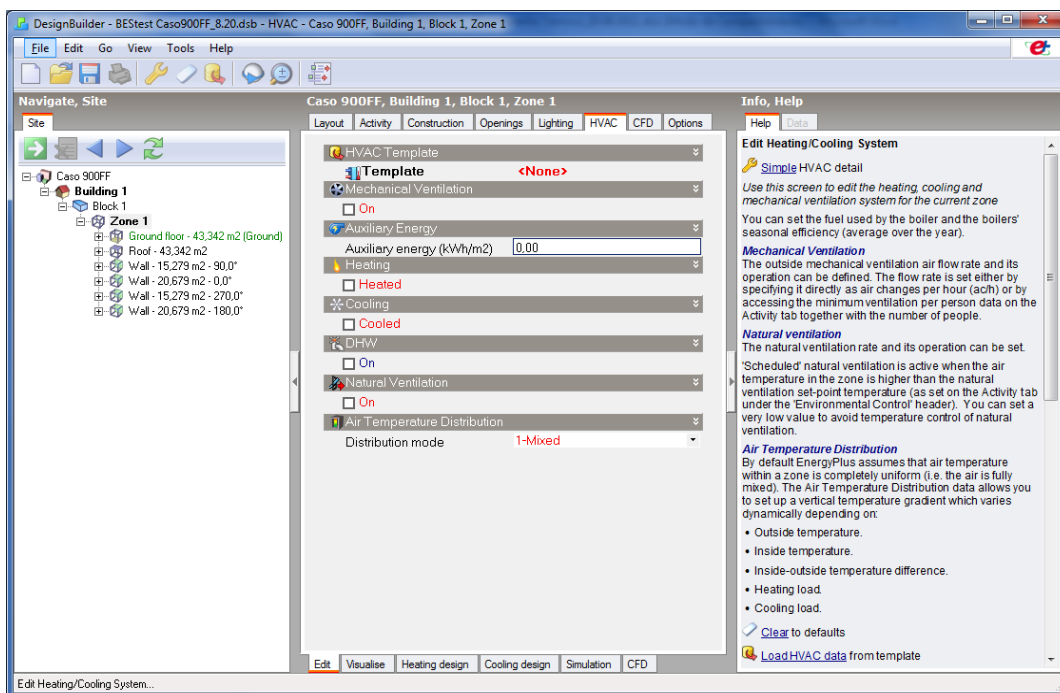


Fig.A.35. – DesignBuilder – Definição do sistema de climatização (HVAC)

#### A.1.4.3. Definição dos parâmetros de Simulação

Em relação aos parâmetros da simulação podemos definir o período de simulação, as opções de simulação e os dados de saída “Outputs”.

A - Definição do período de simulação.

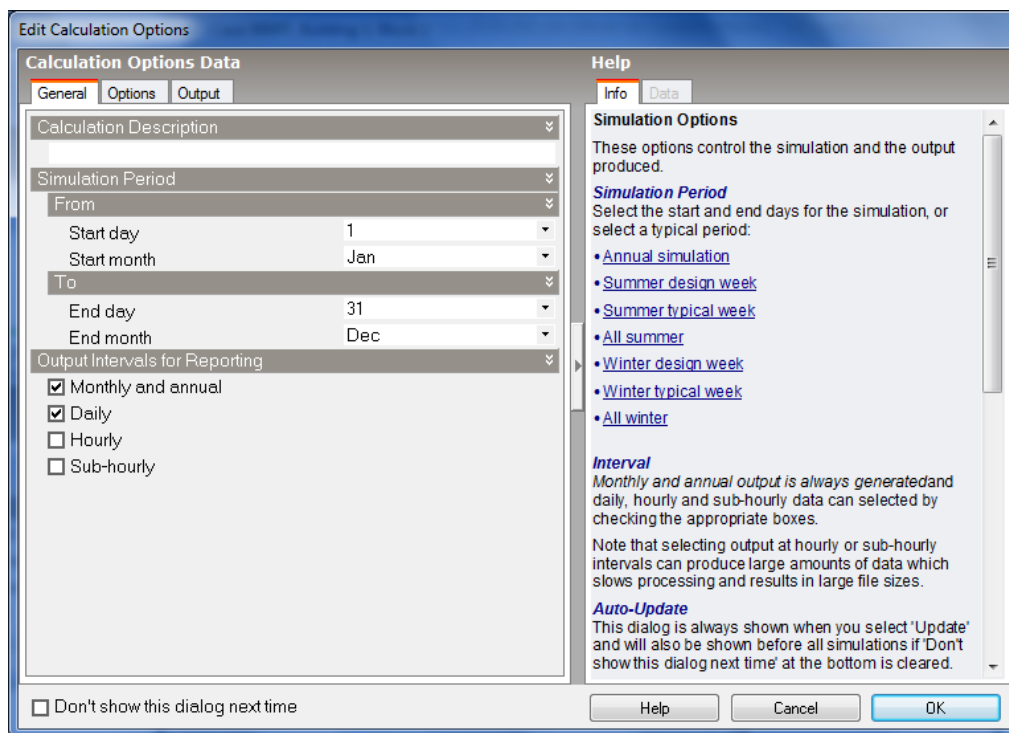


Fig.A.36. – DesignBuilder – Definição do período de simulação

## B - Definição das opções de simulação.

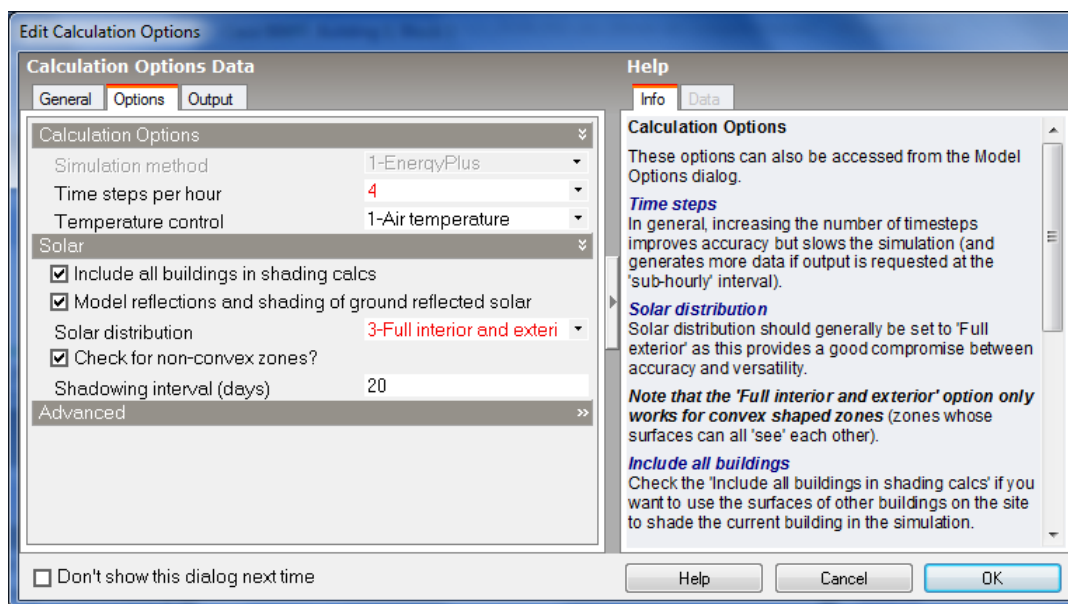


Fig.A.37. – DesignBuilder – Definição das opções de simulação

Número de simulações por hora (*Time steps per hour*) é o número de vezes (passos de tempo) que o cálculo das trocas de calor é resolvido por hora nas simulações. Embora muitos edifícios podem ser simulados com sucesso com 1 ou 2 passos de tempo por hora, o manual do EnergyPlus sugere 4 ou 6 para simulações sem AVAC e 6 ou 10 para simulações com AVAC. No presente trabalho o número de passos de tempo por hora é de 4, resultados obtidos em *Sub-hourly* de 15 em 15 minutos.

## C - Definição dos dados de saída “Outputs”.

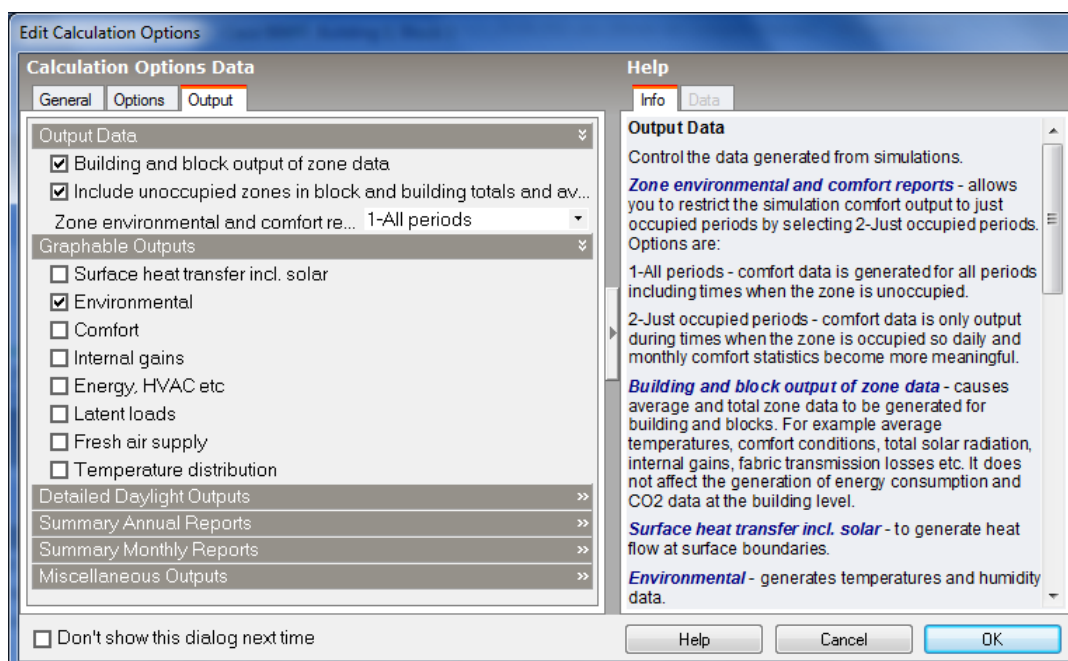


Fig.A.38. – DesignBuilder – Definição dos dados de saída “Outputs”

## A.1.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para o caso 900FF, apresenta-se no Quadro A.9, os resultados da simulação para a Temperatura do Ar Interior. O programa DesignBuilder permite exportar gráficos e tabelas com os resultados da simulação, nas figuras 3.58 e 3.59 pode observar-se gráficos com o resultado da simulação.

Quadro A.9. – Resultados da simulação

BES test – Caso 900FF		Simulação
Temperatura do Ar (°C)	Máxima	43,39
	Mínima	-4,28
	Média Anual	24,85

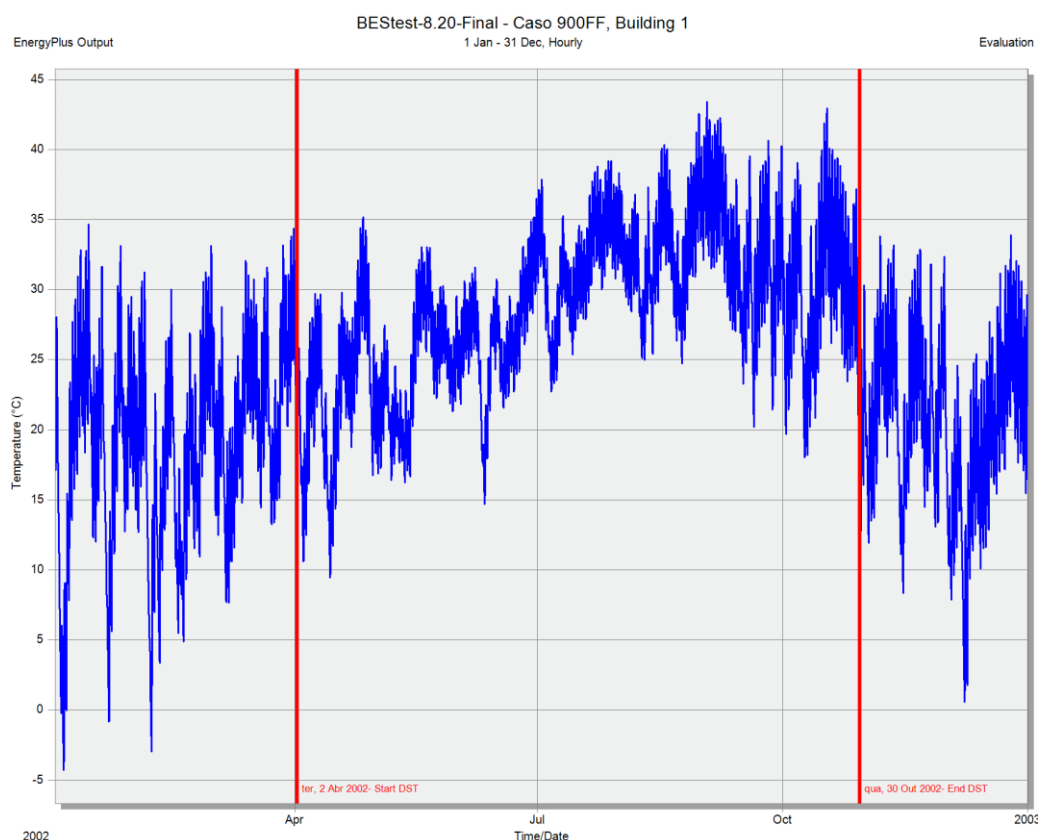


Fig.A.39. – DesignBuilder – Resultado da simulação para a temperatura do ar interior na base horária

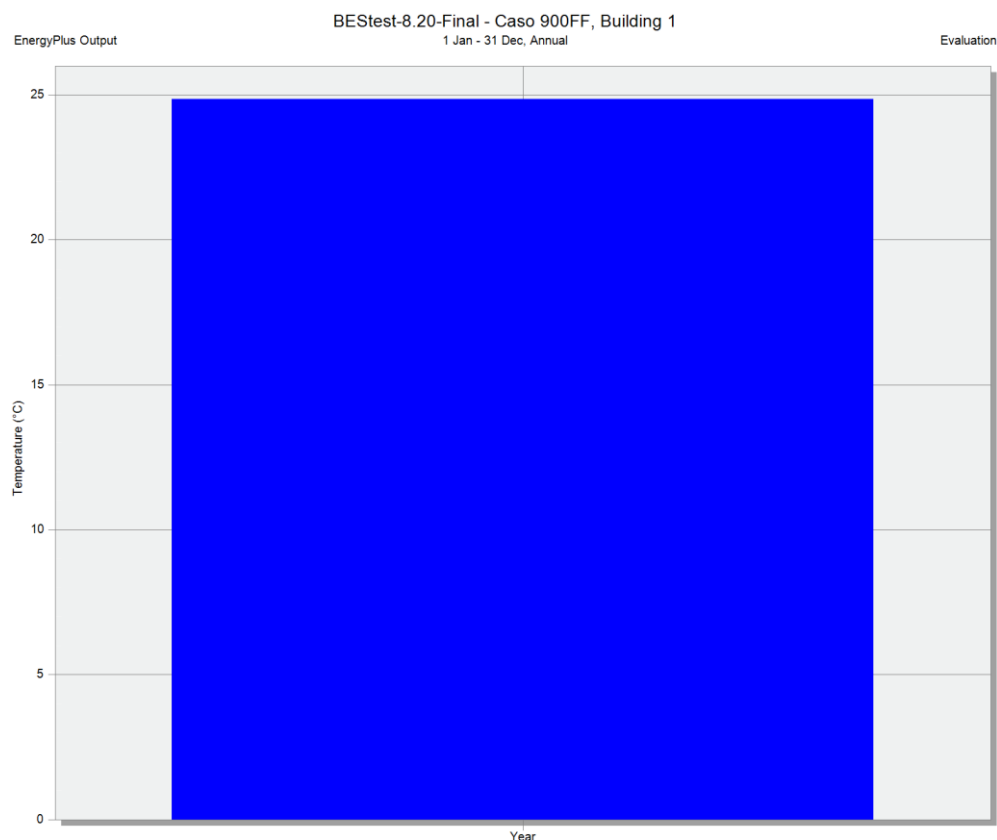


Fig.A.40. – DesignBuilder – Resultado da simulação para a temperatura do ar interior na base Anual, Temperatura Média Anual

#### A.1.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Comparar os resultados obtidos com os resultados fornecidos pelo BEStest para o caso 900FF. Estes resultados foram retirados da norma *Energy Plus Testing With Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ASHRAE Standard 140-2007* [9].

Quadro A.10. – Resultados BEStest e Resultados Obtidos

BEStest – Caso 900FF		Intervalo de Resultados do BEStest	Resultados Obtidos
Temperatura do Ar (°C)	Máxima	41,8°C a 46,4°C	43,39
	Mínima	-6,4°C a -1,6°C	-4,28
	Média Anual	24,5°C a 27,5°C	24,85

Da observação do Quadro A.10, conclui-se que os resultados obtidos com a utilização do programa DesignBuilder se encontram dentro do intervalo de resultados do BEStest.

O método BEStest fornece um intervalo de resultados, tendo em conta as definições que são deixadas por defeito e aquelas em que não se tem informação, assumindo os valores sugeridos pelo programa, pode-se concluir que existem factores que levam a que os resultados possam ser diferentes.

Após a aplicação do método BEStest, podemos concluir que o programa DesignBuilder/EnergyPlus é fiável e que os resultados obtidos estão dentro do esperado.

# Anexo B

## ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

### B.1. – ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Nos quadros seguintes apresentam-se as características térmicas para cada elemento construtivo da envolvente opaca, os materiais e as suas propriedades térmicas e os respetivos coeficientes de transmissão térmica,  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ].

Os valores da condutibilidade térmica, da densidade e da resistência térmica foram retirados do ITE 50 [19]. Os valores para o calor específico são resultantes de pesquisas no livro ASHRAE – Handbook of Fundamentals [38] e de pesquisa na internet [122].

As unidades no sistema internacional (SI) são as seguintes:

▪ $\alpha$ – difusibilidade térmica do material	[ $\text{m}^2/\text{s}$ ];
▪ $\lambda$ – condutibilidade térmica do material	[ $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ];
▪ $e$ – espessura do material	[m];
▪ $h_i$ ; $h_e$ – condutância térmica superficial interior / exterior	[ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ];
▪ $\rho$ - massa volúmica aparente seca da material	[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
▪ $C_p$ – calor específico do material	[ $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ];
▪ $U$ – coeficiente de transmissão térmica do elemento de construção	[ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ];
▪ $R$ – resistência térmica do elemento de construção	[ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ].

A difusibilidade térmica é a razão entre a condutibilidade térmica e o produto da massa volúmica aparente seca pelo calor específico e expressa quão rapidamente um material se ajusta à temperatura que o envolve.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{B.1.})$$

Para o valor da condutibilidade térmica de elementos de construção heterogéneos como por exemplo para os tijolos furados e lajes aligeiradas, utiliza-se o valor da condutibilidade térmica equivalente.

$$\lambda_{equivalente} = \frac{e}{R} \quad (\text{B.2.})$$

Quadro B.1. – Constituição da parede exterior 1 (P.Ext.1)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2	Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3	Espaço de ar		0,040		0,180		
4	Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5	Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
6	Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)				0,54			

Quadro B.2. - Constituição da parede exterior 2 (P.Ext.2)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2	Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3	Espaço de ar		0,040		0,180		
4	Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5	Tijolo furado de 20		0,020		0,520	1200	920
6	Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)				0,50			

Quadro B.3. - Constituição da parede exterior 3 (P.Ext.3)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2	Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3	Espaço de ar		0,040		0,180		
4	Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5	Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
6	Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7	Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2300	920
$U$ total (ITE 50)				0,54			



Quadro B.4. - Constituição da parede exterior 4 (P.Ext.4)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,020		0,100	2500	840
6 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			0,63			

Quadro B.5. - Constituição da parede exterior 5 (P.Ext.5)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
6 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			0,59			

Quadro B.6. - Constituição da parede exterior 6 (P.Ext.6)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
6 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2300	920
$U$ total (ITE 50)			0,60			

Quadro B.7. - Constituição da parede exterior 7 (P.Ext.7)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,080		0,400	2500	840
6 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			0,53			

Quadro B.8. - Constituição da parede exterior 8 (P.Ext.8)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Chapa de alumínio	230,000	0,002			2800	850
2 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
3 Espaço de ar		0,010		0,150		
4 Betão armado	2,000	0,033		0,165	2500	840
5 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			0,75			

Quadro B.9. - Constituição da parede exterior 9 (P.Ext.9)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
6 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7 Rev. aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			0,54			

Quadro B.10. - Constituição da parede exterior 10 (P.Ext.10)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Chapa de alumínio	230,000	0,002			2800	
2 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
3 Espaço de ar		0,010		0,150		
4 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
5 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			0,73			

Quadro B.11. - Constituição da parede exterior 11 (P.Ext.11)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
6 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7 Rev. aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			0,58			

Quadro B.12. - Constituição da parede exterior 12 (P.Ext.12)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
6 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			0,54			

Quadro B.13. - Constituição da parede exterior 13 (P.Ext.13)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Tijolo furado de 11		0,110		0,270	730	920
3 Espaço de ar		0,040		0,180		
4 Isolamento térmico (EPS)	0,037	0,030		0,811	20	
5 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
6 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
7 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			0,60			

Quadro B.154. - Constituição da parede divisória 1 (P.Div.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 20		0,020		0,520	1200	920
3 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			1,18			

Quadro B.165. - Constituição da parede divisória 2 (P.Div.2)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 20		0,020		0,520	1200	920
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2300	920
$U$ total (ITE 50)			1,20			

Quadro B.16. - Constituição da parede divisória 3 (P.Div.3)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
3 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			1,39			

Quadro B.17. - Constituição da parede divisória 4 (P.Div.4)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2000	920
<b><math>U</math> total (ITE 50)</b>			<b>1,43</b>			

Quadro B.18. - Constituição da parede divisória 5 (P.Div.5)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	745
<b><math>U</math> total (ITE 50)</b>			<b>1,42</b>			

Quadro B.19. - Constituição da parede divisória 6 (P.Div.6)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2000	920
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	745
<b><math>U</math> total (ITE 50)</b>			<b>1,46</b>			

Quadro B.20. - Constituição da parede divisória 7 (P.Div.7)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
3 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
<b><math>U</math> total (ITE 50)</b>			<b>1,89</b>			

Quadro B.21. - Constituição da parede divisória 8 (P.Div.8)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2300	920
$U$ total (ITE 50)			1,96			

Quadro B.22. - Constituição da parede divisória 9 (P.Div.9)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Betão armado	2,000	0,040		0,200	2500	840
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	750
$U$ total (ITE 50)			1,95			

Quadro B.23. - Constituição da parede divisória 10 (P.Div.10)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Betão armado	2,000	0,150		0,200	2500	840
3 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
$U$ total (ITE 50)			2,47			

Quadro B.24. - Constituição da parede divisória 11 (P.Div.11)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2000	920
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Rer. em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,32			

Quadro B.25. - Constituição da parede divisória 12 (P.Div.12)

Material	$\lambda$	Espessura	$U$	$R$	$\rho$	$C_p$
	[W/m.°C]	[m]	[W/m <sup>2</sup> .°C]	[m <sup>2</sup> .°C/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg.°C]
1 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	745
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Rer. em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,32			

Quadro B.26. - Constituição da parede divisória 13 (P.Div.13)

Material	$\lambda$	Espessura	$U$	$R$	$\rho$	$C_p$
	[W/m.°C]	[m]	[W/m <sup>2</sup> .°C]	[m <sup>2</sup> .°C/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg.°C]
1 Revestimento em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	400	920
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Rer. em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,21			

Quadro B.27. - Constituição da parede divisória 14 (P.Div.14)

Material	$\lambda$	Espessura	$U$	$R$	$\rho$	$C_p$
	[W/m.°C]	[m]	[W/m <sup>2</sup> .°C]	[m <sup>2</sup> .°C/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
3 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
4 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,40			

Quadro B.28. - Constituição da parede divisória 15 (P.Div.15)

Material	$\lambda$	Espessura	$U$	$R$	$\rho$	$C_p$
	[W/m.°C]	[m]	[W/m <sup>2</sup> .°C]	[m <sup>2</sup> .°C/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg.°C]
1 Revestimento cerâmico	1,040	0,005		0,005	2000	920
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,44			

Quadro B.29. - Constituição da parede divisória 16 (P.Div.16)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	750
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,43			

Quadro B.30. - Constituição da parede divisória 17 (P.Div.17)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
2 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
3 Tijolo furado de 15		0,015		0,390	928	920
4 Reboco tradicional	1,30	0,015		0,012	1000	840
5 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,41			

Quadro B.31. – Constituição do pavimento exterior (revestimento da face superior em aglomerado de cortiça) 1  
(Pav.Ext.Cort.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em Mono-massa	1,000	0,015		0,015	1600	840
2 Laje em betão armado	2,000	0,300		0,255	2500	920
3 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
4 Betonilha de regulação	1,30	0,040		0,031	1900	920
5 Rer. em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,38			

Quadro B.32. – Constituição do pavimento divisório (revestimento da face superior em cerâmica) 1 (Pav.Cer.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Laje fungiforme	1,177	0,300		0,255	2000	920
3 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
4 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
5 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	745
$U$ total (ITE 50)			1,10			



Quadro B.33. – Constituição do pavimento divisório (cerâmica / teto falso) 2 (Pav.Cer.2)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Teto falso (metático)	72,00	0,002		0,000		
2 Espaço de ar		0,500		0,21		
3 Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
4 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
5 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
6 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	745
$U$ total (ITE 50)			0,92			

Quadro B.34. – Constituição do pavimento em contato com o solo (revestimento cerâmico) 3 (Pav.Cer.3)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Laje em betão armado	2,00	0,020		0,100	2500	840
2 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
3 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
4 Revestimento cerâmico	1,30	0,010		0,008	2300	750
$U$ total (ITE 50)			1,39			

Quadro B.35. – Constituição do pavimento divisório (revestimento da face superior em aglomerado de cortiça) 1 (Pav.Cort.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
3 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
4 Betonilha de regulação	1,30	0,040		0,031	1900	920
5 Revestimento em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,02			

Quadro B.36. – Constituição do pavimento divisório (aglomerado de cortiça / teto falso) 2 (Pav.Cort.2)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Teto falso (metático)	72,00	0,002		0,000		
2 Espaço de ar		0,500		0,21		
3 Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
4 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
5 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
6 Revestimento em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			0,87			

Quadro B.37. – Constituição do pavimento em contato com o solo (revestimento com aglomerado de cortiça) 3 (Pav.Cort.3)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Laje em betão armado	2,00	0,020		0,100	2500	840
2 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
3 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
4 Revestimento em aglomerado de cortiça	0,065	0,005		0,008	500	170
$U$ total (ITE 50)			1,27			

Quadro B.38. – Constituição do pavimento divisório (revestimento da face superior em linóleo) 1 (Pav.Lin.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Teto falso (metático)	72,00	0,002		0,000		
2 Espaço de ar		0,500		0,21		
3 Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
4 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
5 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
6 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1400	1200
$U$ total (ITE 50)			1,09			

Quadro B.39. – Constituição do pavimento em contato com o solo (revestimento com linóleo) 2 (Pav.Lin.2)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Laje em betão armado	2,00	0,020		0,100	2500	840
2 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
3 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
4 Revestimento em linóleo	0,17	0,003		0,015	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,38			

Quadro B.40. – Constituição do pavimento em contato com o solo (revestimento com resina epoxídica) 1 (Pav.Res.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Laje em betão armado	2,00	0,020		0,100	2500	840
2 Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
3 Betonilha de regulação	1,30	0,035		0,027	1900	920
4 Rer. em Resina epoxídica	0,20	0,002		0,010	1200	1400
$U$ total (ITE 50)			1,38			

Quadro B.41. – Constituição da cobertura exterior 1 (Cob.Ext.1)

Material	$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1 Reboco em estuque projetado	0,430	0,015		0,035	1000	840
2 Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
3 Camada de forma	0,33	0,010		0,242	800	840
4 Betonilha de regulação	1,30	0,050		0,038	1900	920
5 Impermeabilização (PVC)	0,14	0,005		0,008	400	920
6 Geotextil	0,250	0,001		0,004		
7 Isolamento térmico (XPS)	0,037	0,050		1,351	25	
8 Geotextil	0,250	0,001		0,004		
9 Proteção em godo lavado	2,00	0,05		0,025	2200	920
$U$ total (ITE 50)			0,46			

Quadro B.42. – Constituição da cobertura exterior (com teto falso) 2 (Cob.Ext.2)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Teto falso (metático)	72,00	0,002		0,000		
2	Espaço de ar		0,500		0,21		
3	Laje fungiforme	1,177	0,30		0,255	2000	920
4	Camada de forma	0,33	0,080		0,242	800	840
5	Betonilha de regulação	1,30	0,050		0,038	1900	920
6	Impermeabilização (PVC)	0,14	0,005		0,008	400	920
7	Geotextil	0,250	0,001		0,004		
8	Isolamento térmico (XPS)	0,037	0,050		1,351	25	
9	Geotextil	0,250	0,001		0,004		
10	Proteção em godo lavado	2,00	0,05		0,025	2200	920
$U$ total (ITE 50)				0,42			

Quadro B.43. – Constituição da porta exterior (Por.Ext.)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
1	Chapa de alumínio	230,000	0,002			2800	850
2	Espaço de ar		0,010		0,150		
3	Chapa de alumínio	230,000	0,002			2800	850
$U$ total (ITE 50)				2,44			

Quadro B.44. – Constituição da porta divisória (Por.Div.)

Material		$\lambda$ [W/m.°C]	Espessura [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$R$ [m <sup>2</sup> .°C/W]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.°C]
Madeira maciça semi-densa		0,180	0,035		0,194	600	2000
$U$ total (ITE 50)				2,20			

# Anexo C

## RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

### C.1. – INTRODUÇÃO

Apresentação de alguns resultados das simulações, relativas à variação da temperatura média diária do ar ( $T_a$ ) no interior do espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada) ao longo do ano, considerando o tipo de controlo da temperatura interior (Cti), para aferir da sensibilidade dos espaços relativas aos elementos que constituem os vãos envidraçados em relação às seguintes variáveis:

- Orientação;
- Área do vão envidraçado;
- Inércia Térmica;
- Espaço que servem.

Apresenta-se também uma análise das condições no interior dos espaços comparando-se a variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ), da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial no cento do vidro ( $T_s$ ) para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul.

O caso em análise corresponde ao modelo de um edifício, localizado em Bragança, em que o espaço a simular tem o seguinte cenário: 6,00 m de fachada; 3,00 m de profundidade (Prof1); fachada (envolvente exterior) com 3,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{parede\_3}$  cm) e cobertura com 6,0 cm de isolamento térmico ( $EI_{cobertura\_6}$  cm), ambos com revestimento exterior claro; para a ventilação considerou-se a opção (Ra1 [0,6 h<sup>-1</sup>/0,0 h<sup>-1</sup>]); sombreamento por elementos horizontais exteriores (SEh); dispositivos de proteção solar pelo exterior (PSe); caixilho em alumínio sem corte térmico (Al sem corte térmico) e vidro duplo (Vd) incolor (incolor).

### C.2. – CONTROLO DA TEMPERATURA INTERIOR: SEM CLIMATIZAÇÃO (CTIS)

Para a situação sem climatização (Ctis), **inércia térmica forte (F)**, em função da orientação do vão envidraçado e da relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 10% e 30%, nas figuras C.1 e C.2 apresenta-se respetivamente, a comparação anual da variação da temperatura média diária do ar no espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada), nas figuras C.3 a C.6 apresenta-se respetivamente, a variação horária da temperatura do ar no espaço A.0 e no espaço B.1, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. Nas figuras C.7 a C.16 apresenta-se a variação horária da temperatura do ar, da temperatura média radiante e da temperatura superficial no cento do vidro para os vãos envidraçados orientados a Norte e

a Sul nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura exterior.

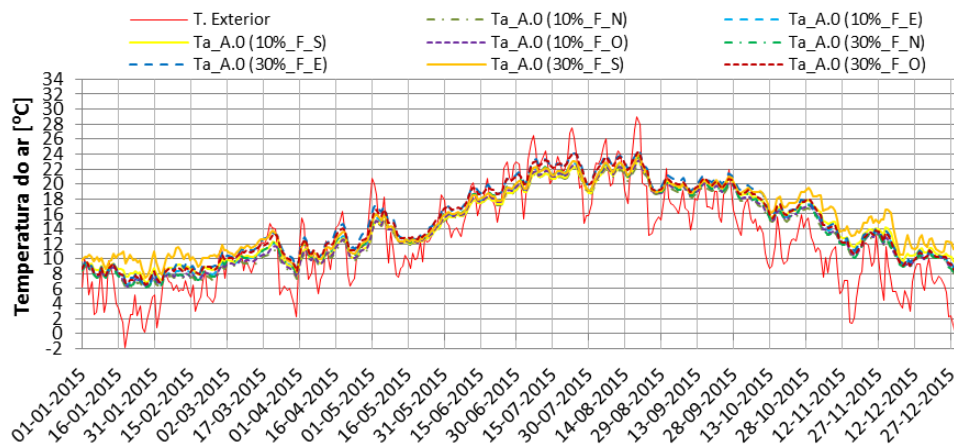


Fig.C.1 - Ctis\_F\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço A.0

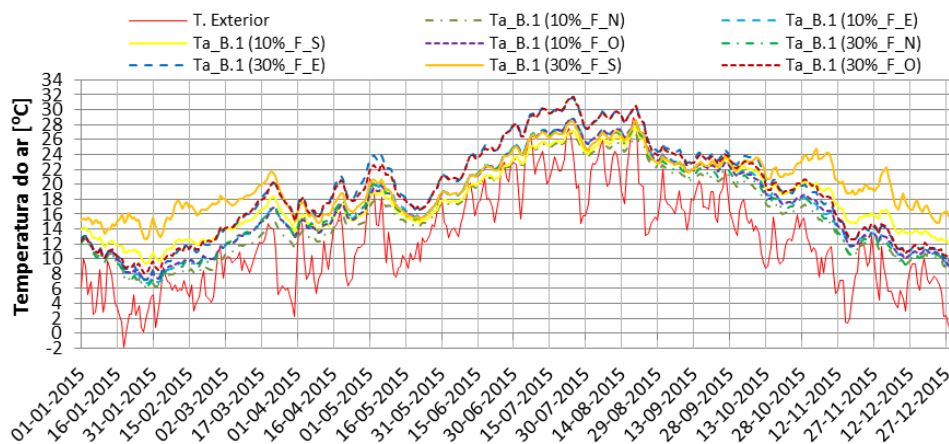


Fig.C.2 - Ctis\_F\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço B.1

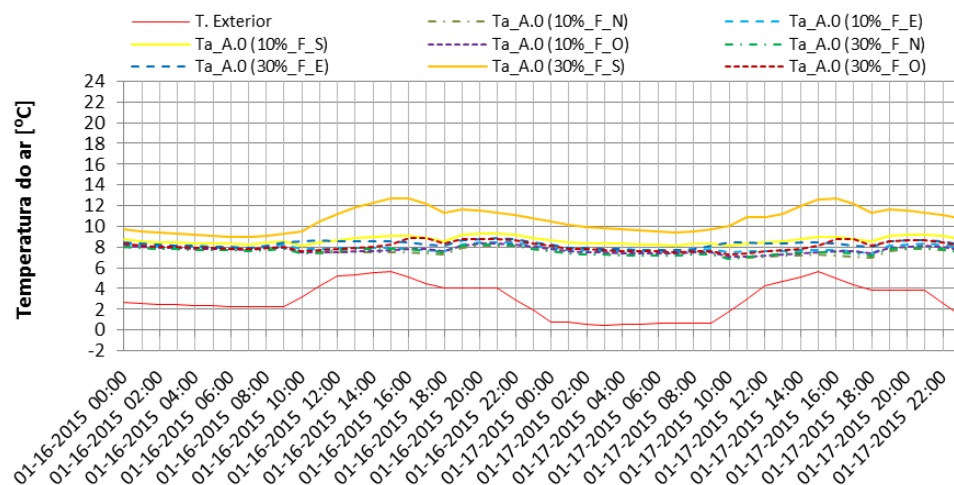


Fig.C.3 – Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

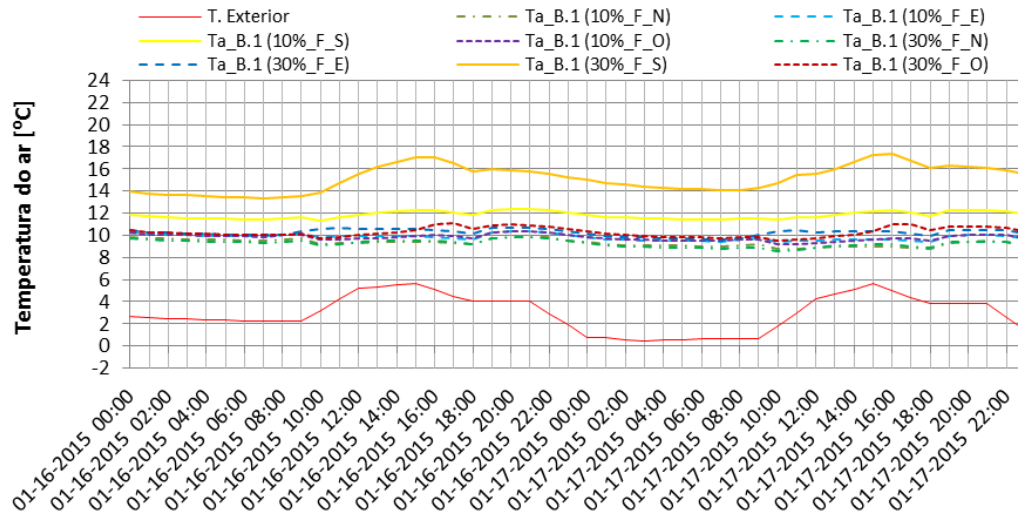


Fig.C.4 – Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

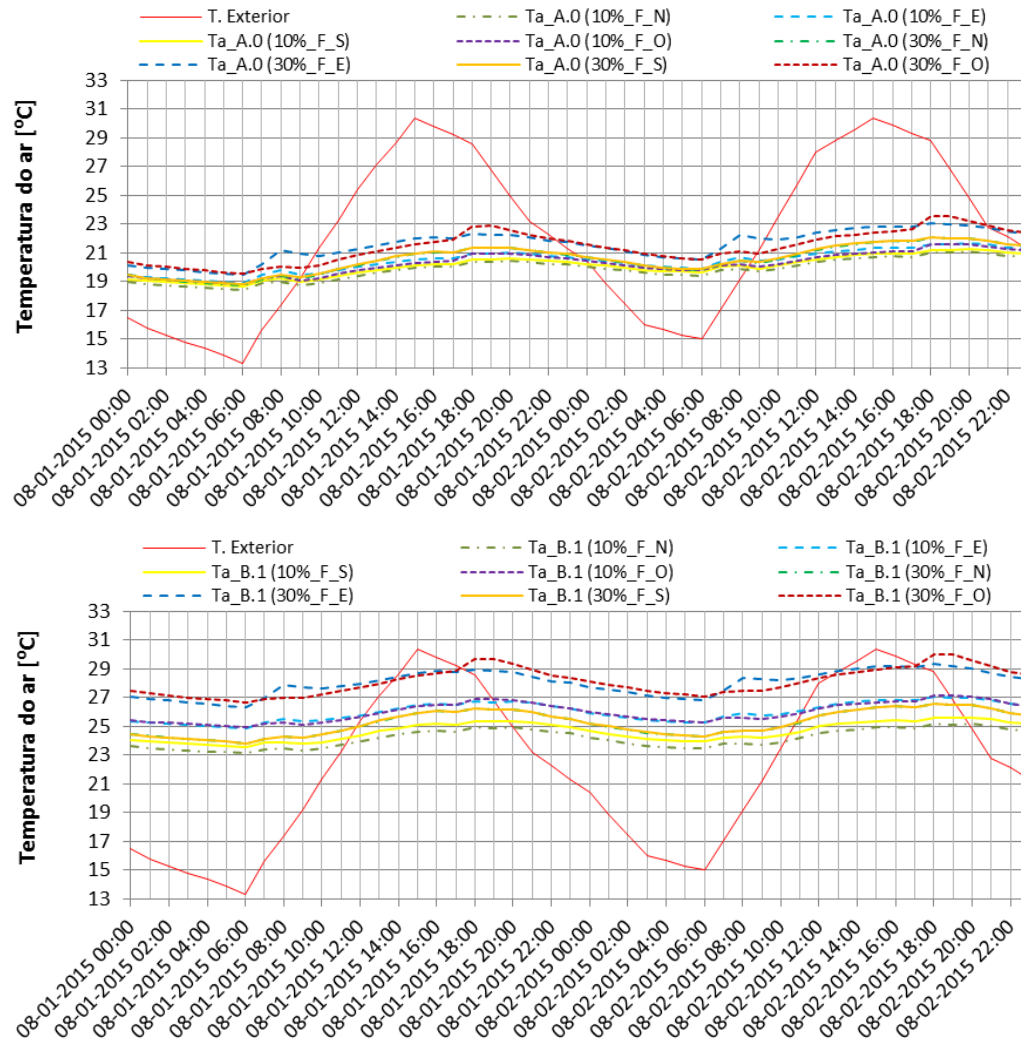


Fig.C.5 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

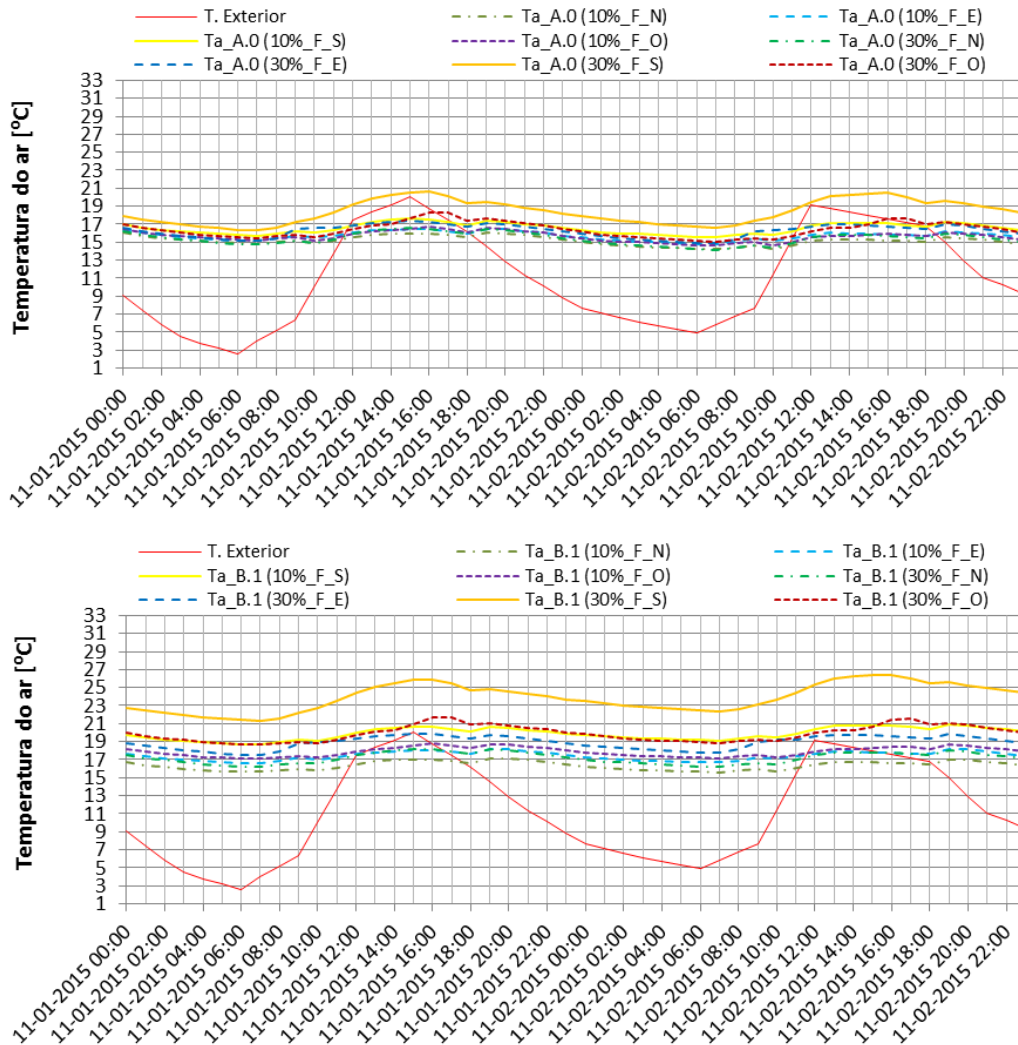


Fig.C.6 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

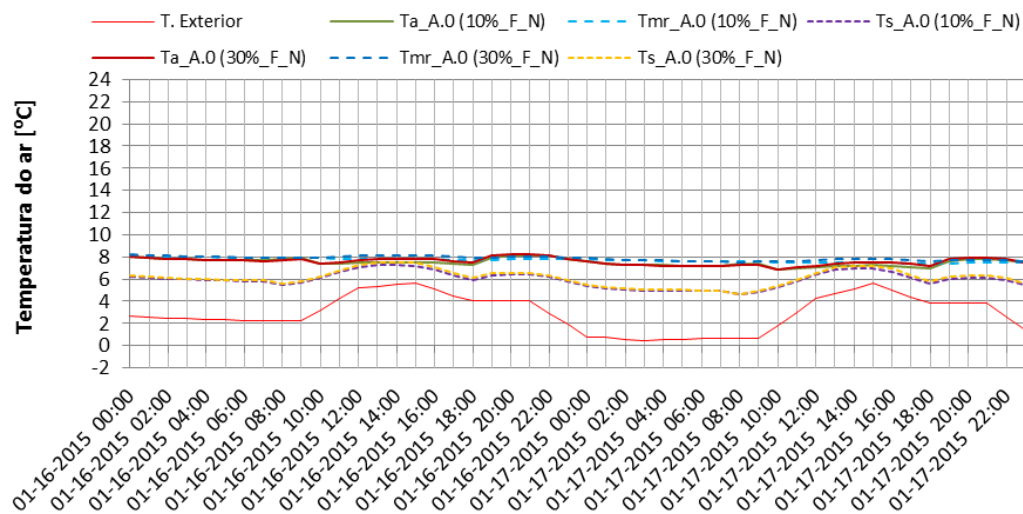


Fig.C.7 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)



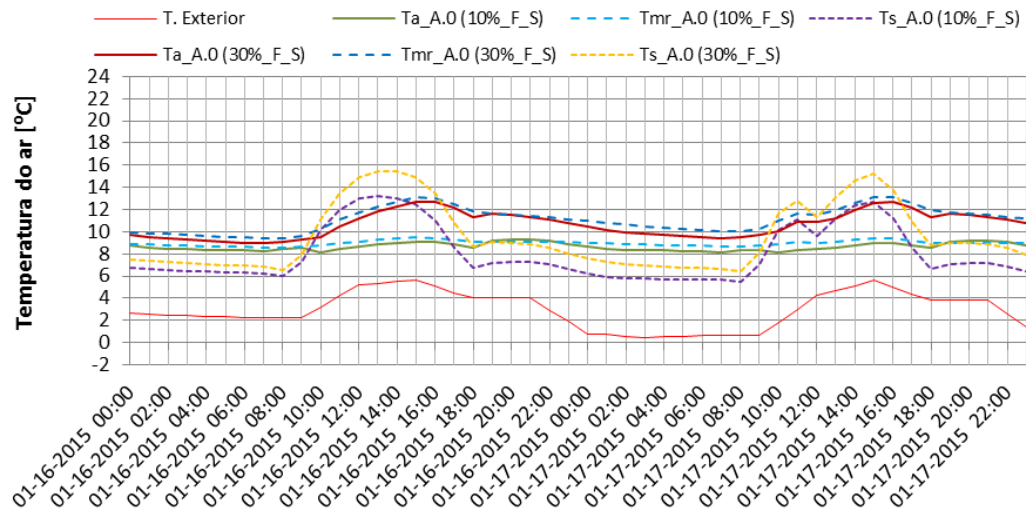


Fig.C.8 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

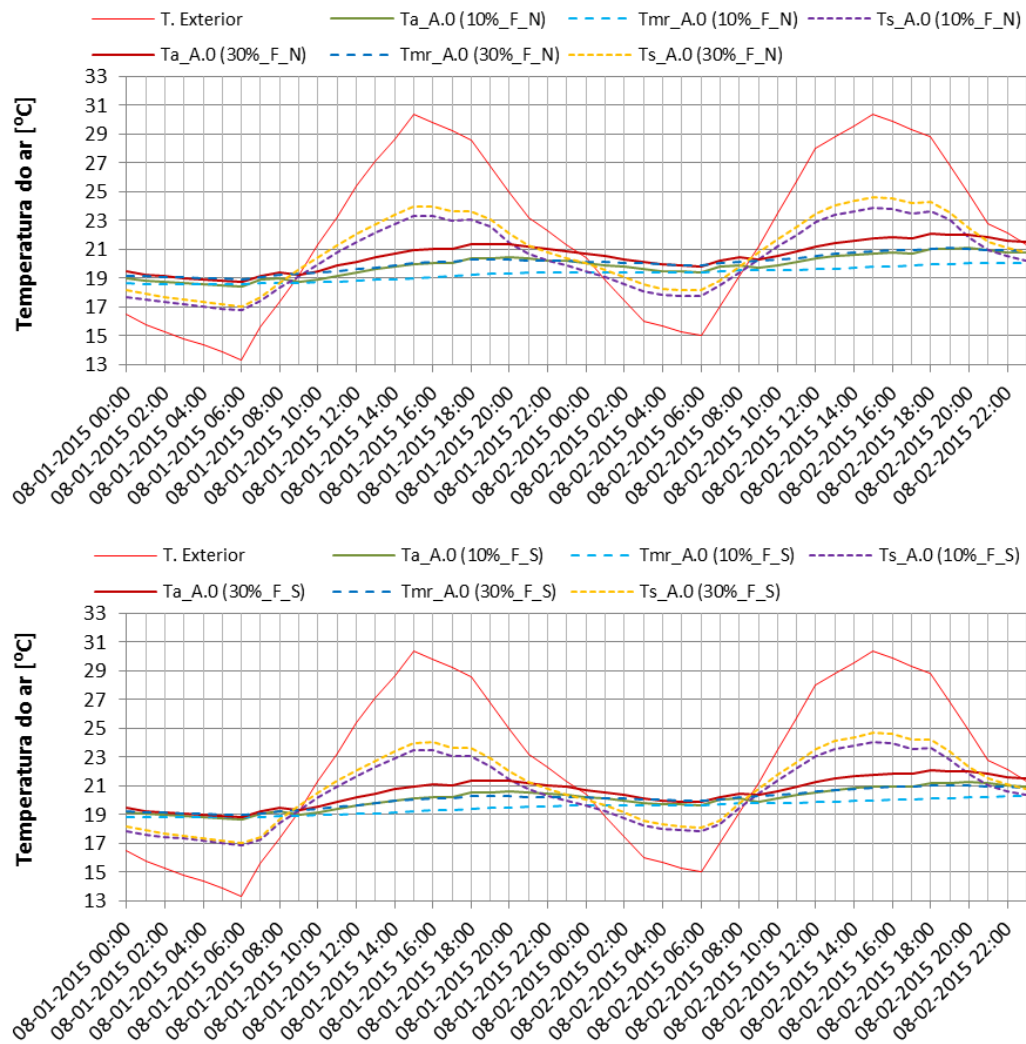


Fig.C.9 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

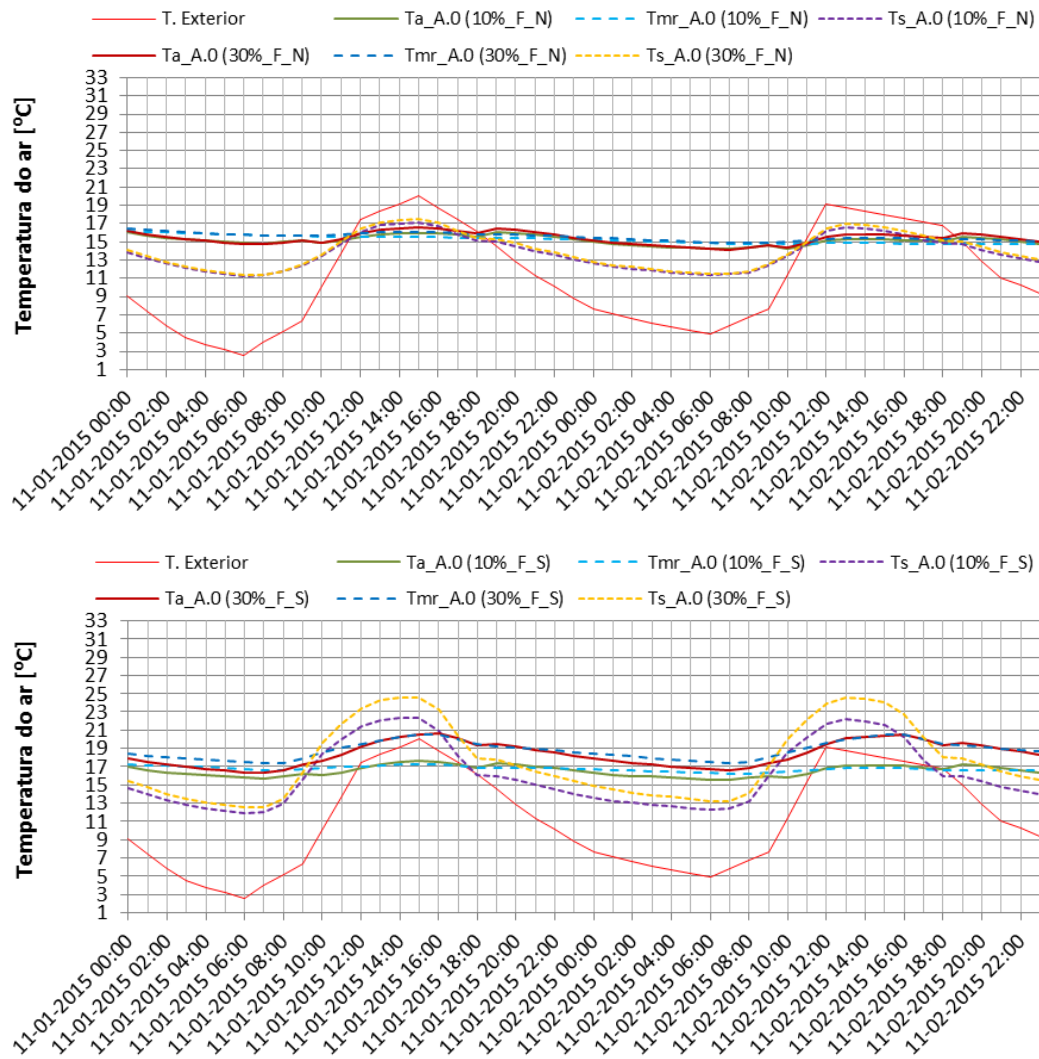


Fig.C.10 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

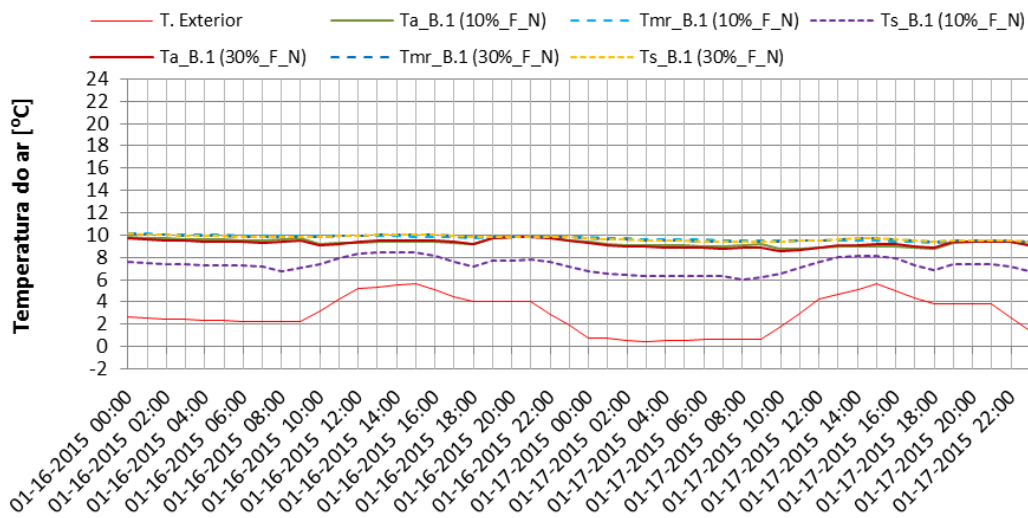


Fig.C.11 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

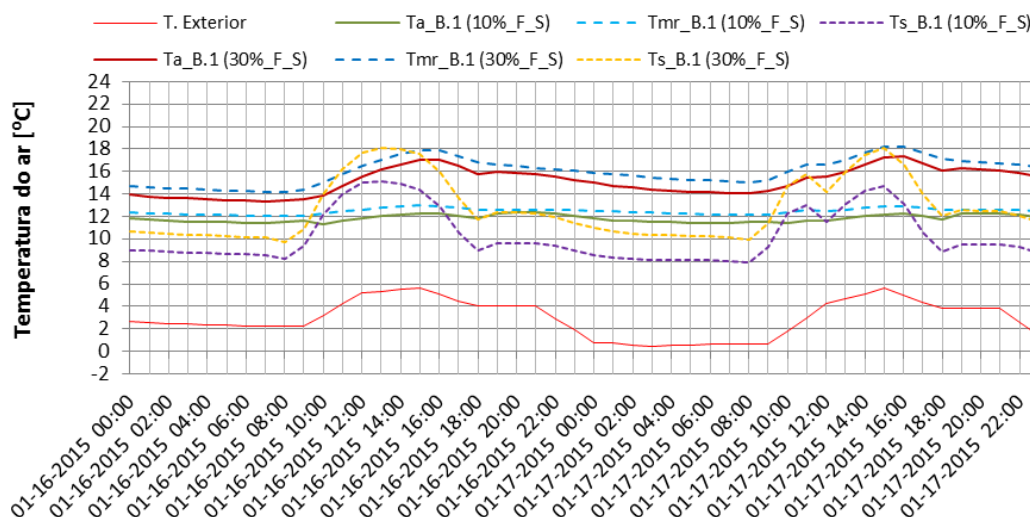


Fig.C.12 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

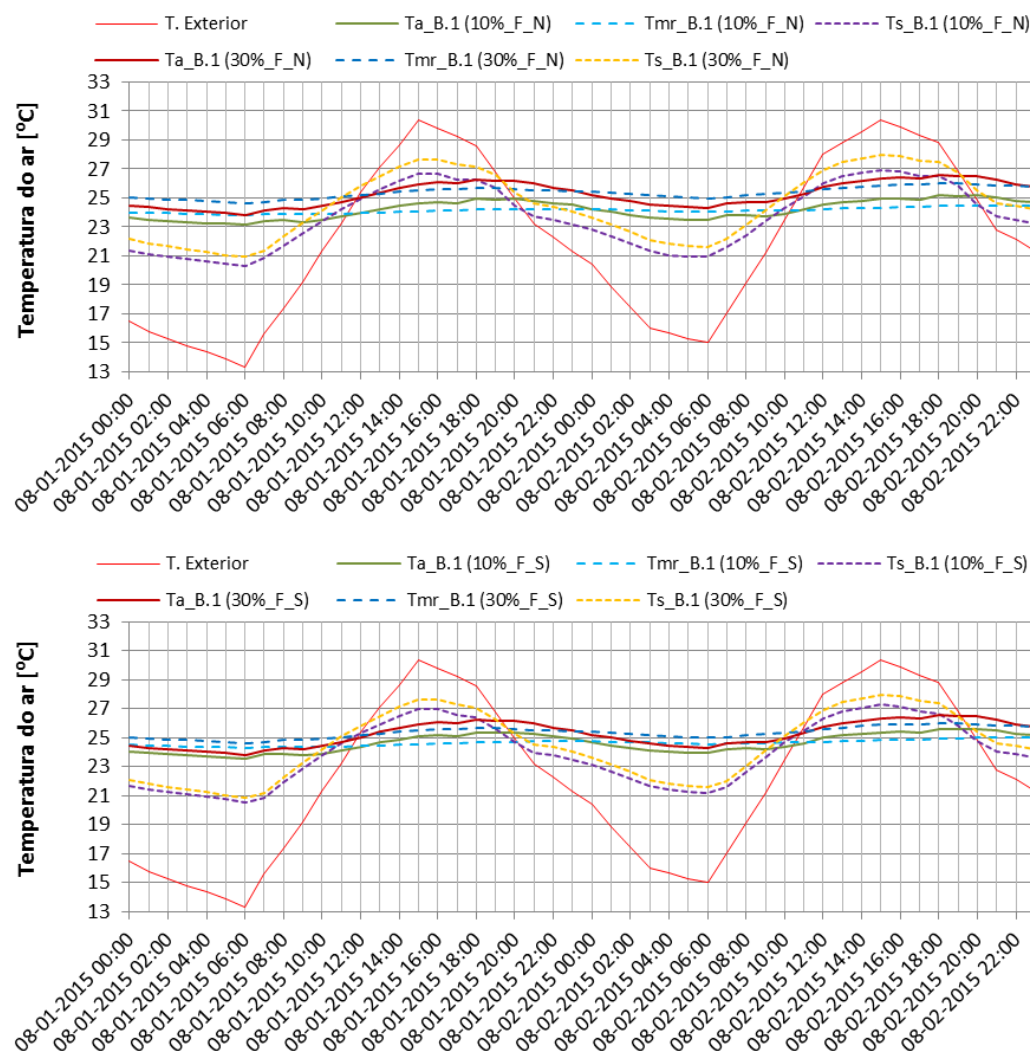


Fig.C.13 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

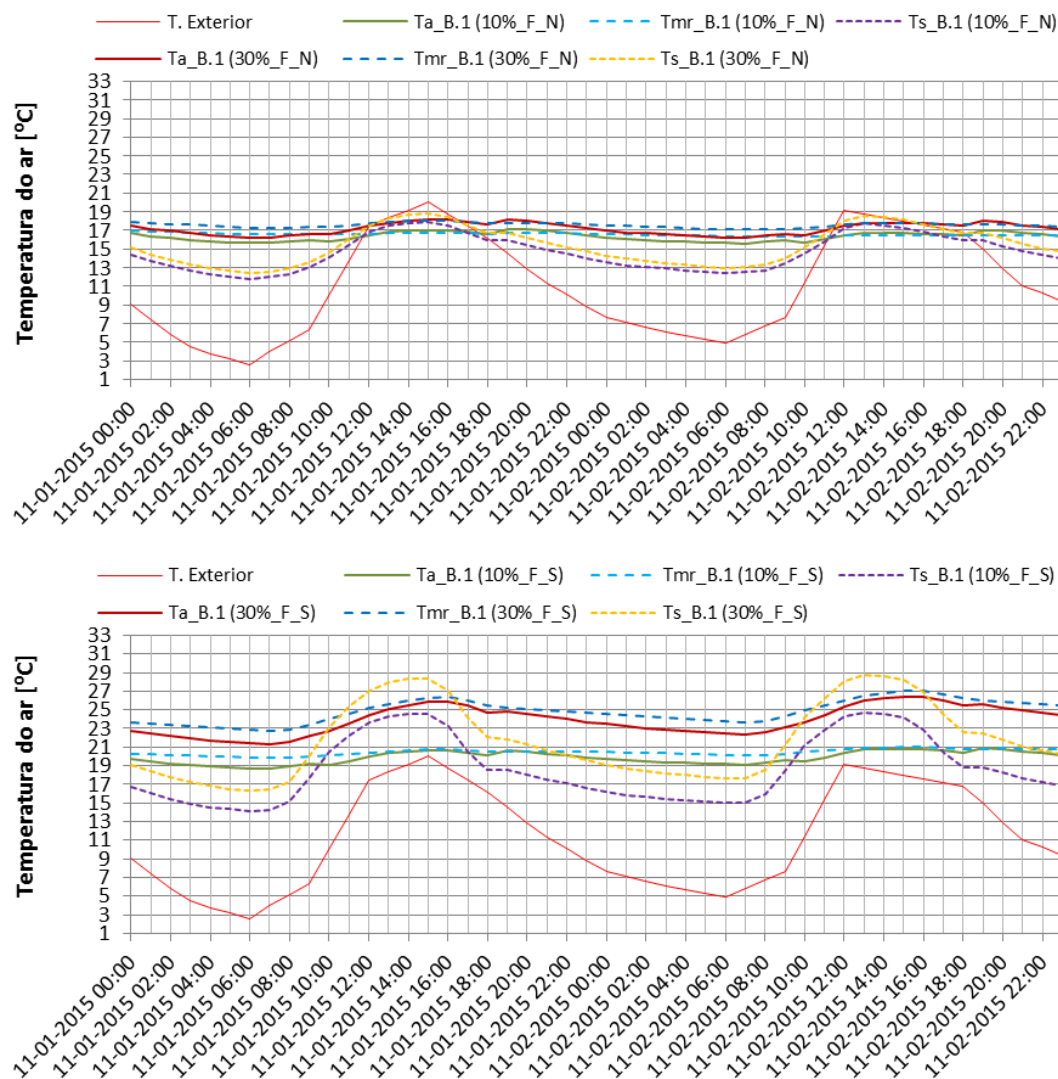


Fig.C.14 - Ctis\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

Para a situação sem climatização (Ctis), **inércia térmica fraca (f)**, em função da orientação do vão envidraçado e da relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 10% e 30%, nas figuras C.15 e C.16 apresenta-se respetivamente, a comparação anual da variação da temperatura média diária do ar no espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada), nas figuras C.17 a C.20 apresenta-se respetivamente, a variação horária da temperatura do ar no espaço A.0 e no espaço B.1, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. Nas figuras C.21 a C.28 apresenta-se a variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ), da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial ( $T_s$ ) no cento do vidro para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura exterior.

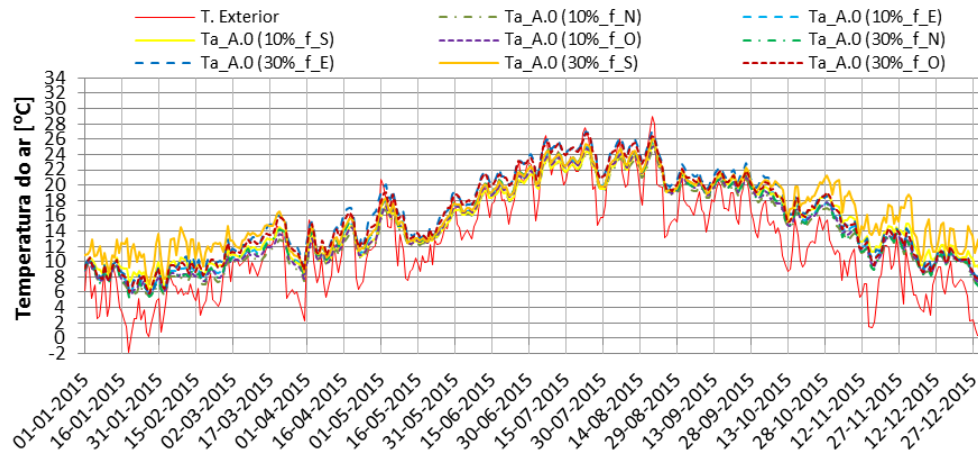


Fig.C.15 - Ctis\_f\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço A.0

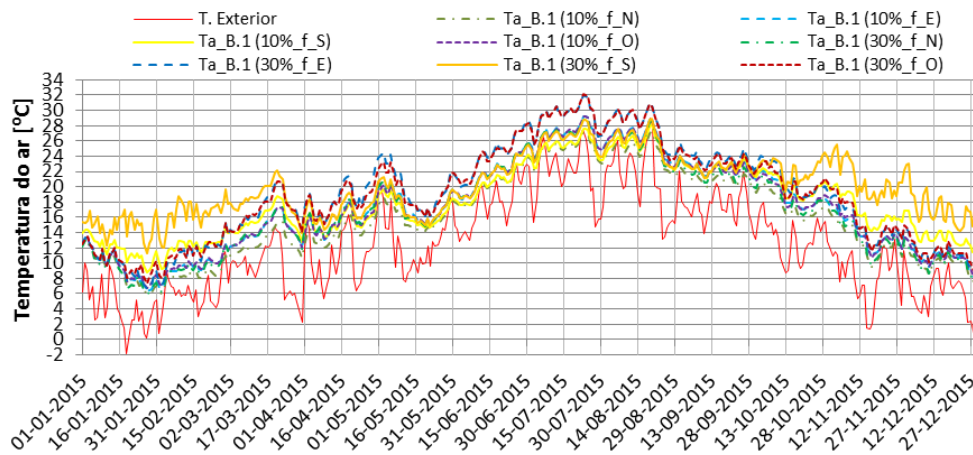


Fig.C.16 - Ctis\_f\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço B.1

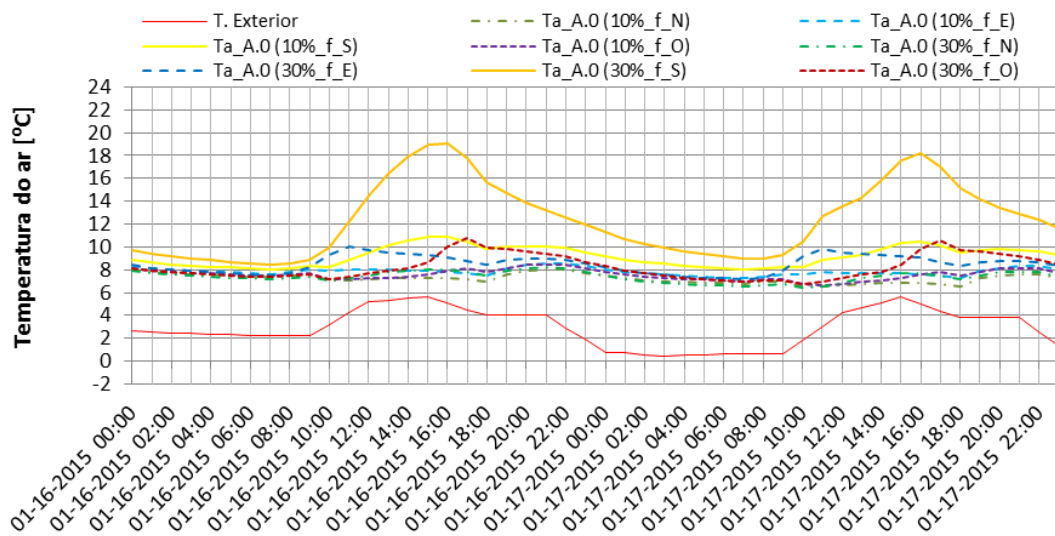


Fig.C.17 – Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)



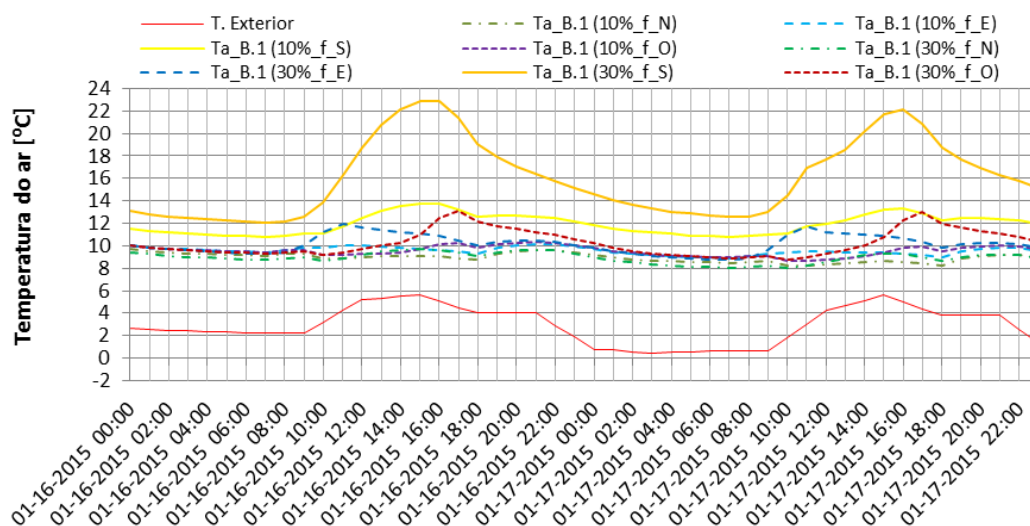


Fig.C.18 – Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

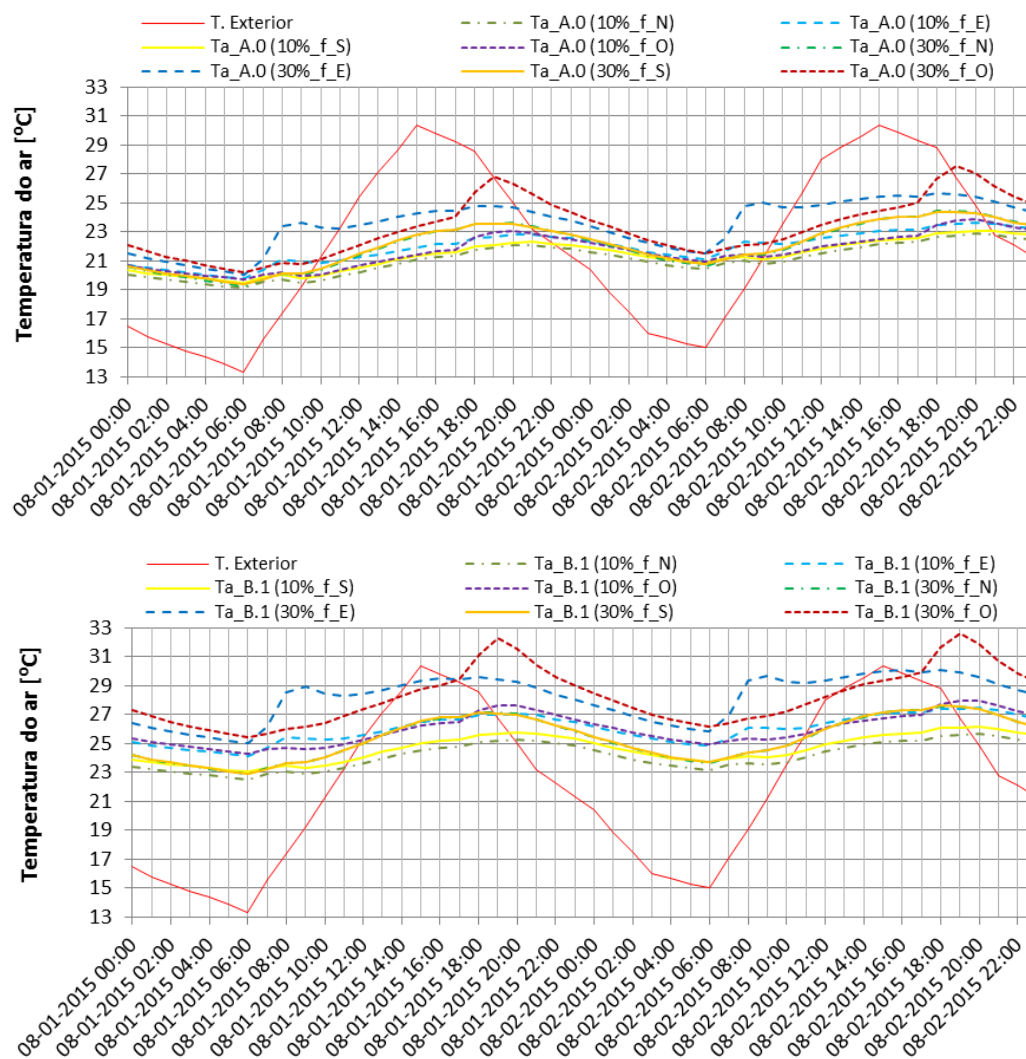


Fig.C.19 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

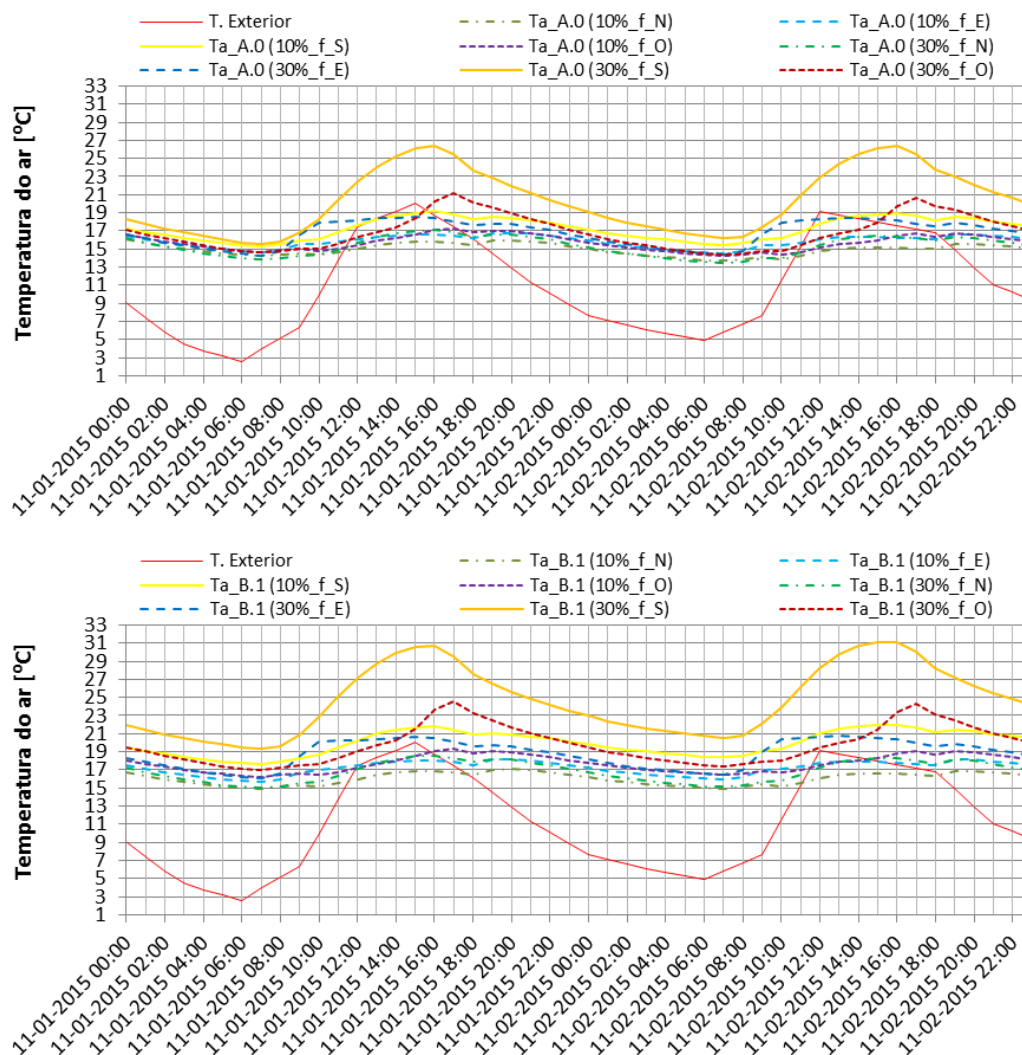


Fig.C.20 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

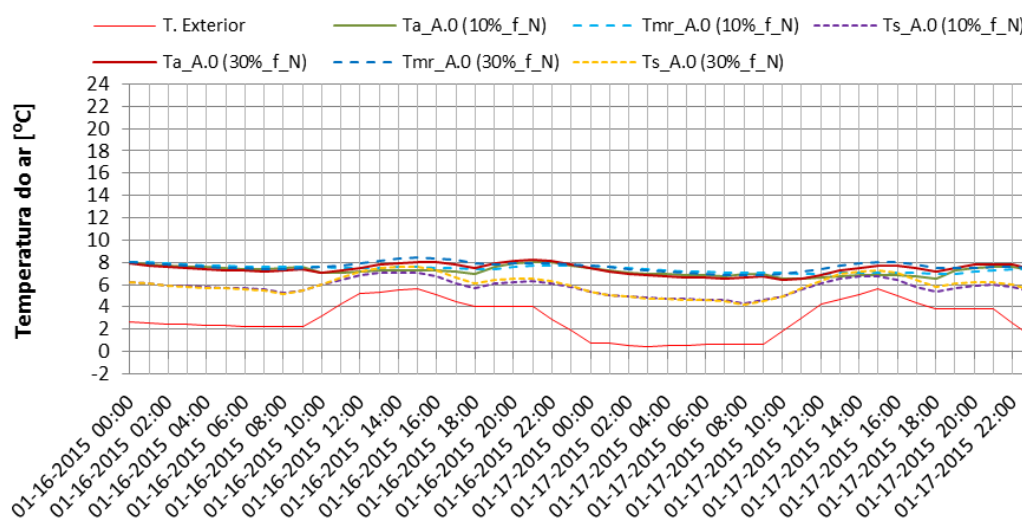


Fig.C.21 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

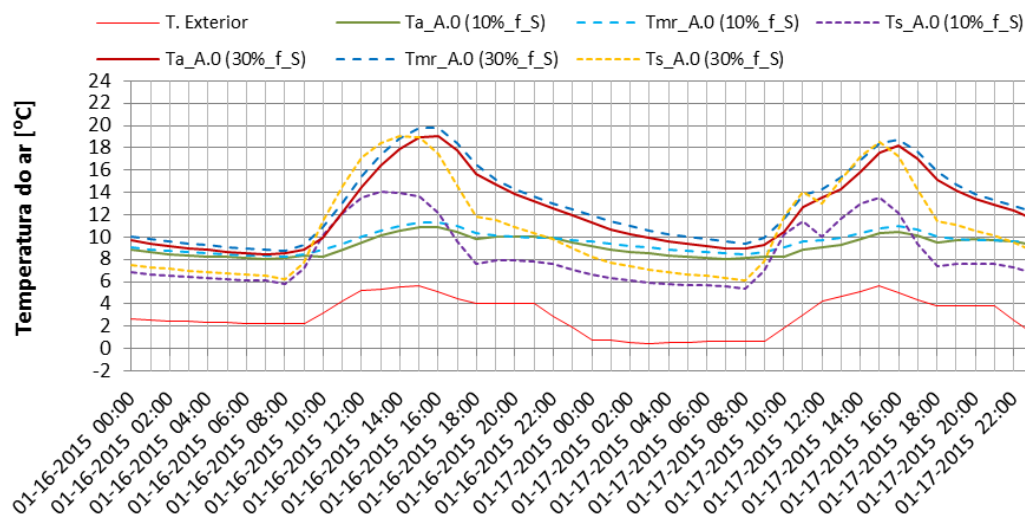


Fig.C.22 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço A.O, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

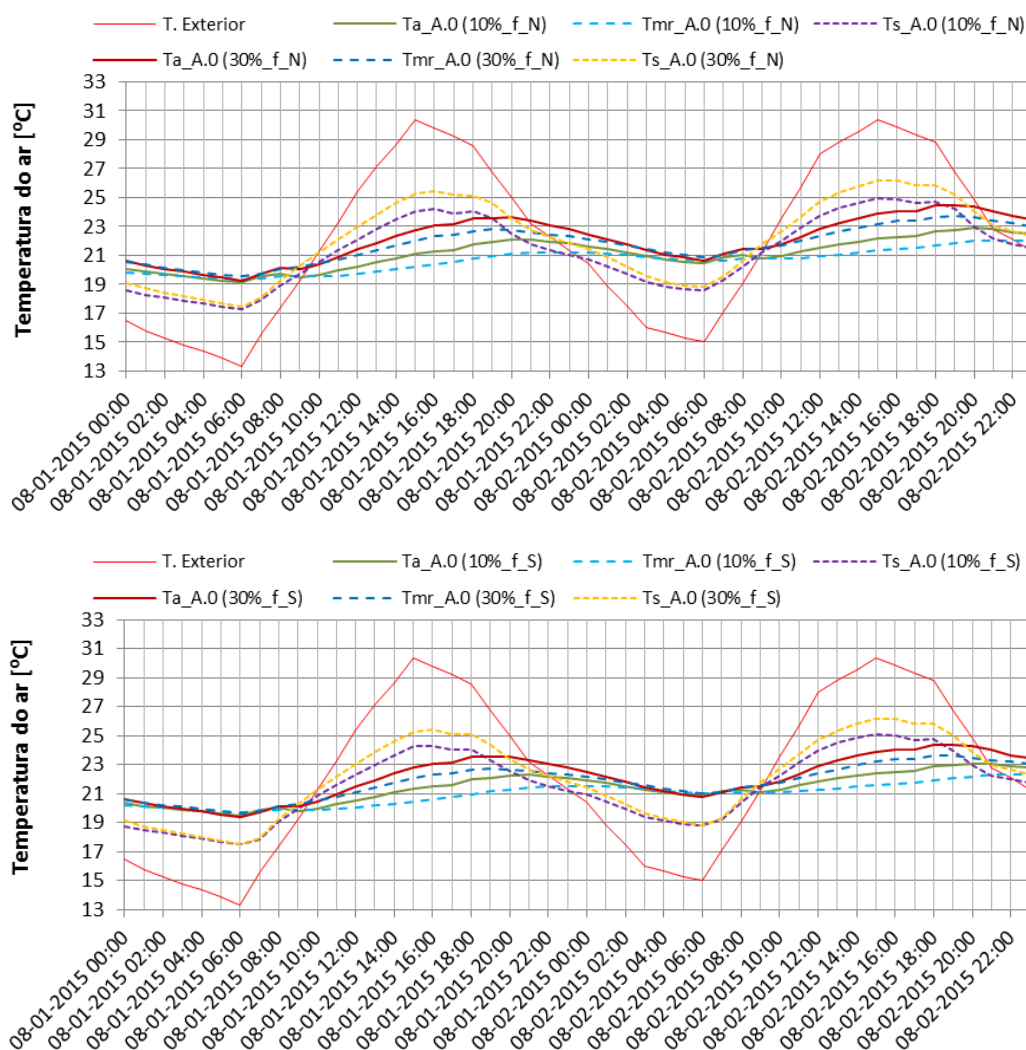


Fig.C.23 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.O, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)



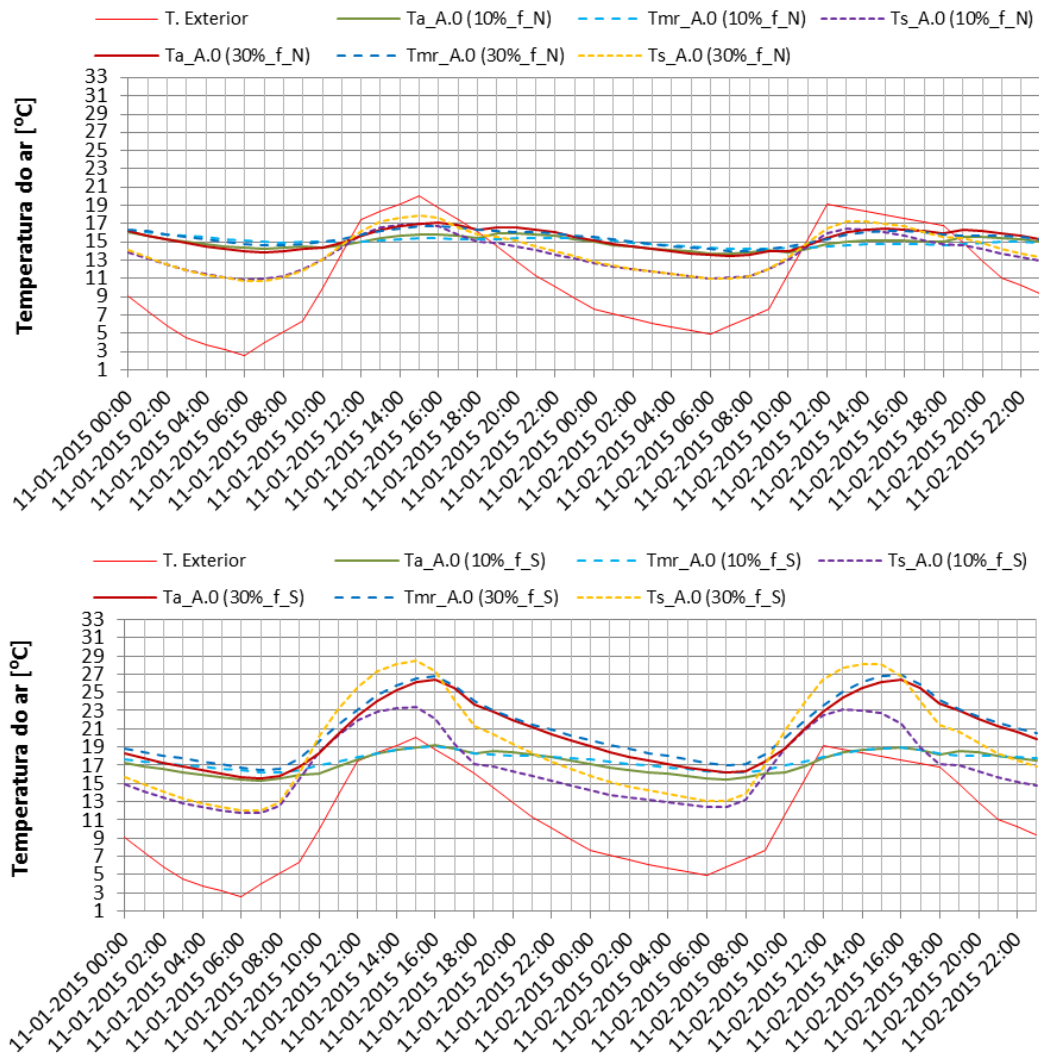


Fig.C.24 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

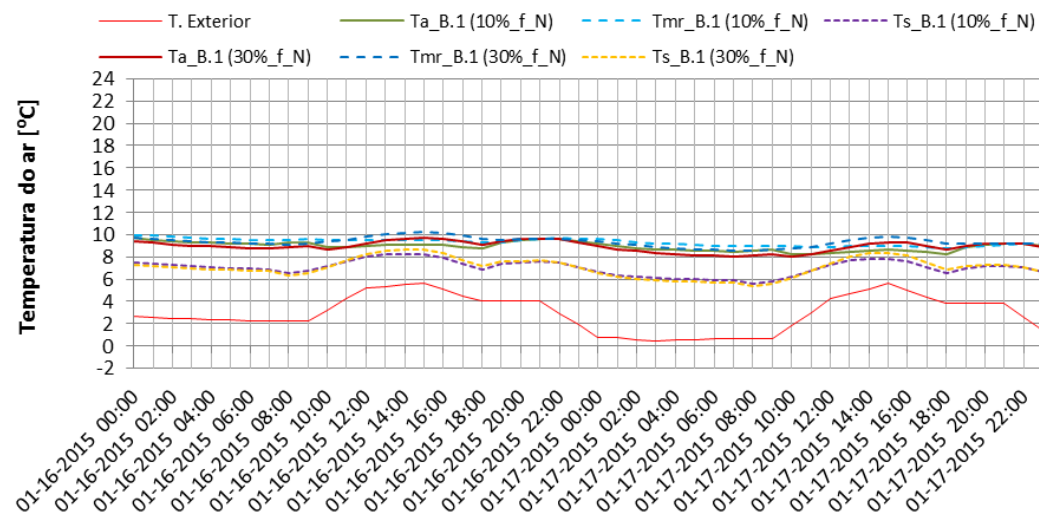


Fig.C.25 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

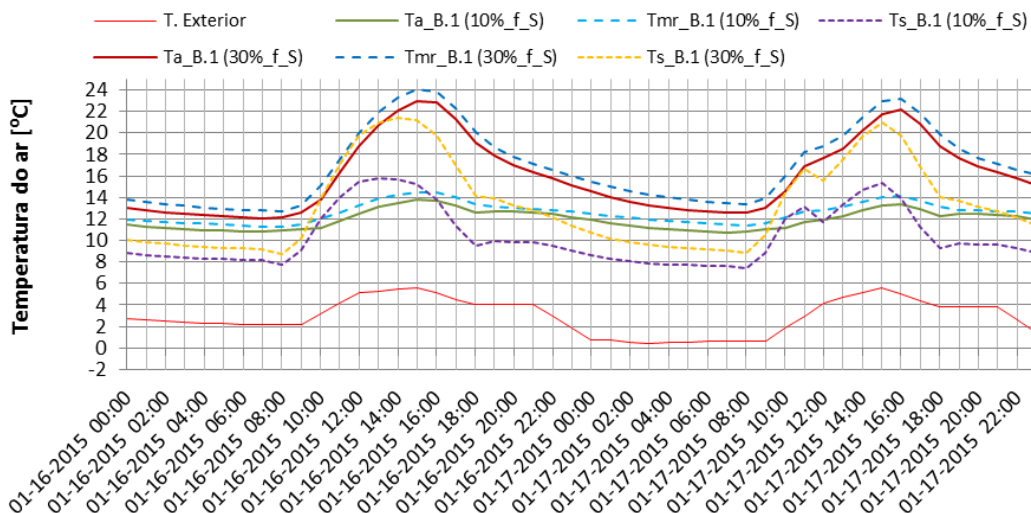


Fig.C.26 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

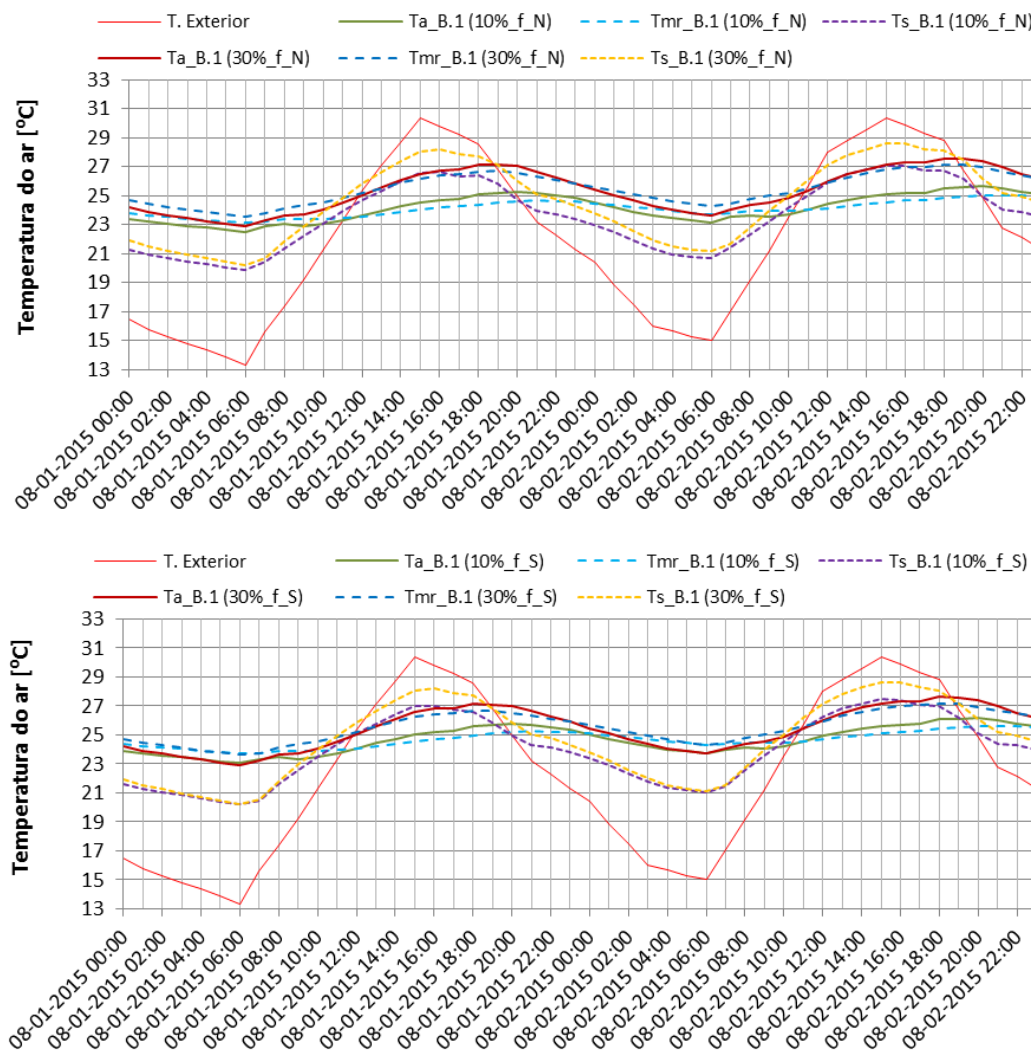


Fig.C.27 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

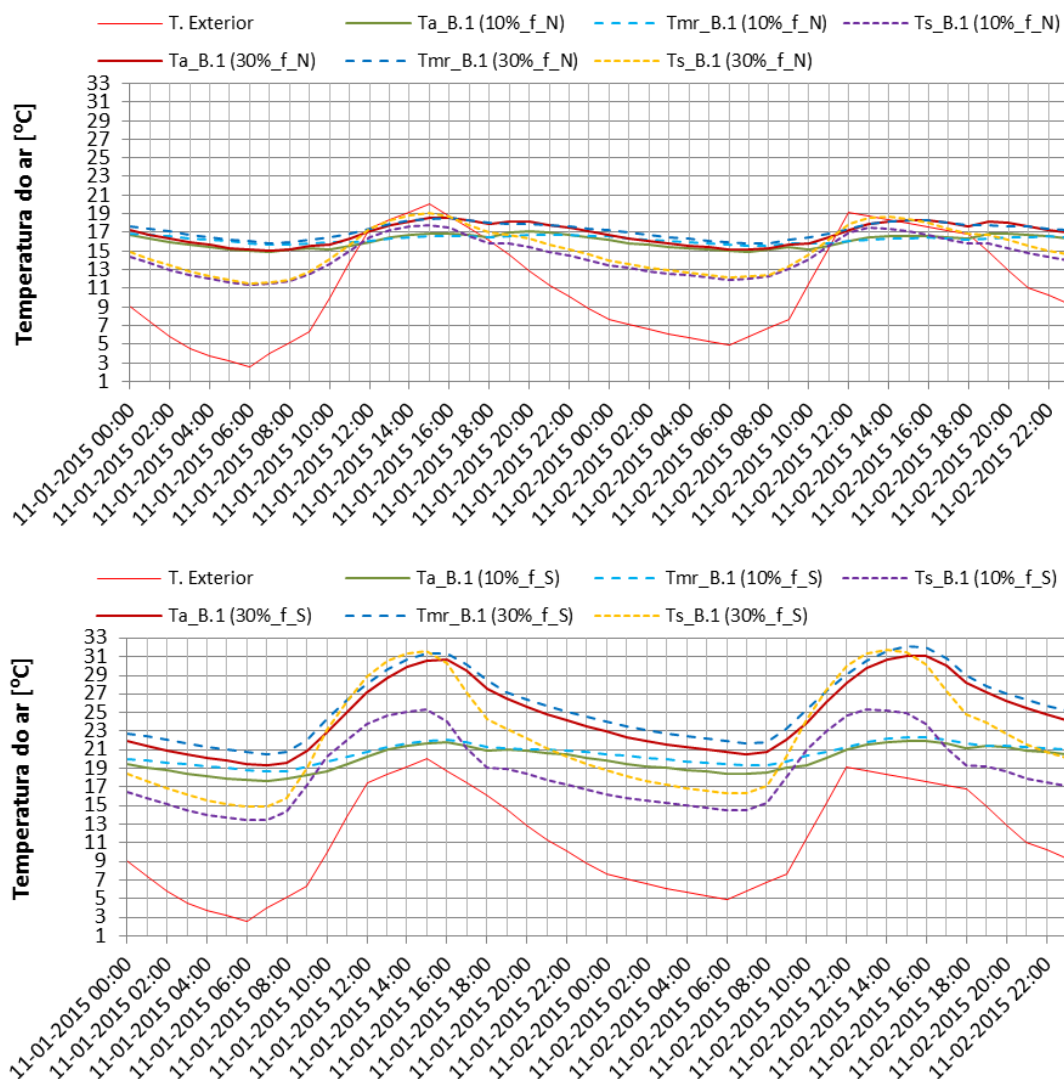


Fig.C.28 - Ctis\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

### C.3. – CONTROLO DA TEMPERATURA INTERIOR: COM CLIMATIZAÇÃO (CTIC)

Para a situação com climatização (Ctic), **inércia térmica forte (F)**, em função da orientação do vão envidraçado e da relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 10% e 30%, nas figuras C.29 e C.30 apresenta-se respetivamente, a comparação anual da temperatura média diária do ar do ar no espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada), nas figuras C.31 a C.34 apresenta-se respetivamente, a variação horária da temperatura do ar no espaço A.0 e no espaço B.1, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. Nas figuras C.35 a C.4 apresenta-se a variação horária da temperatura do ar, da temperatura média radiante e da temperatura superficial no cento do vidro para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura exterior.

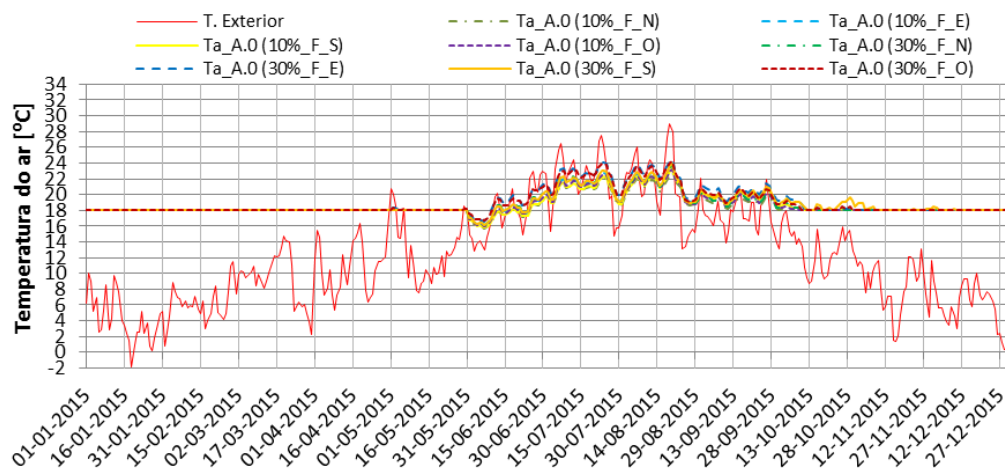


Fig.C.29 - Ctic\_F\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço A.0

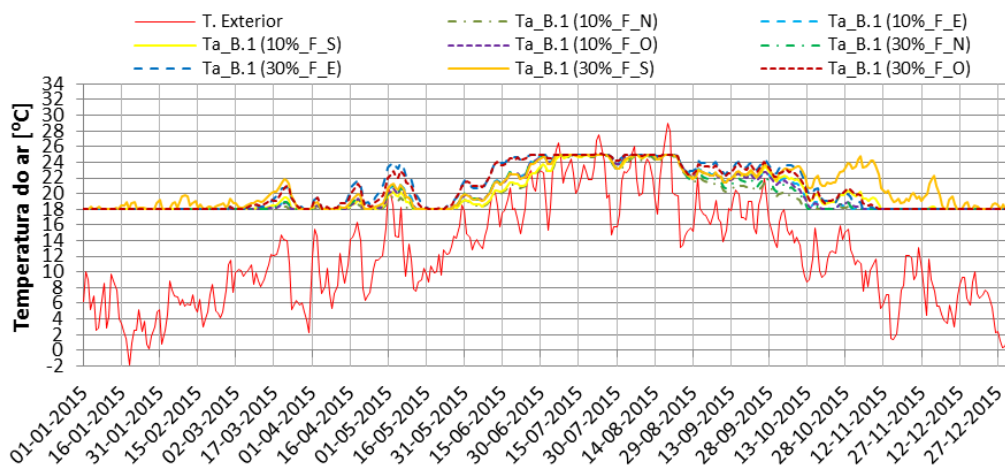


Fig.C.30 - Ctic\_F\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço B.1

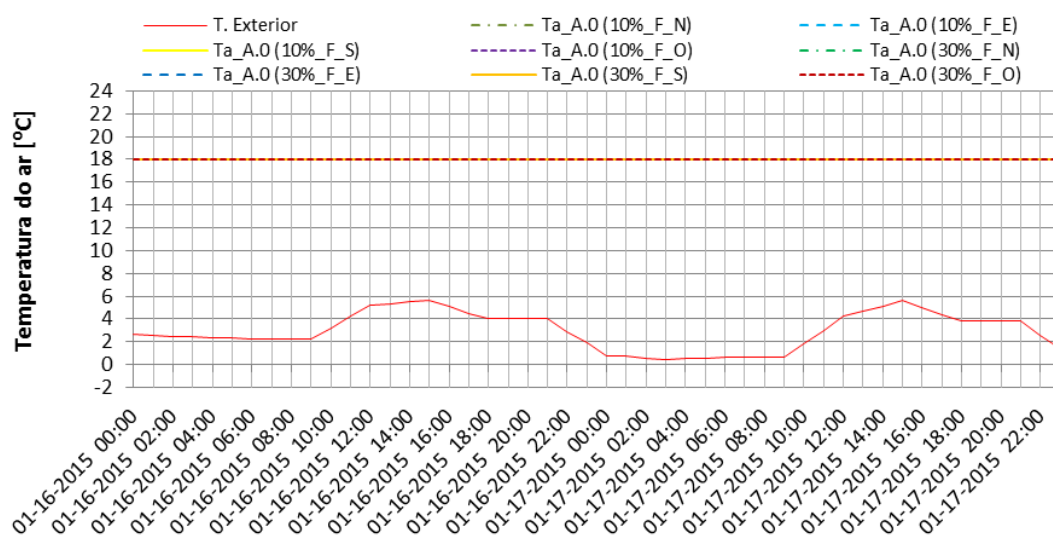


Fig.C.31 – Ctic\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

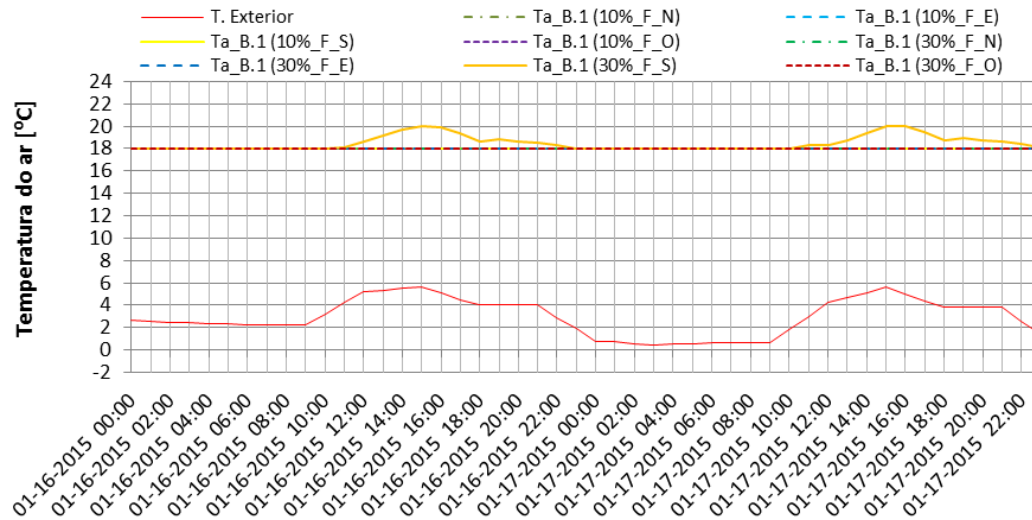


Fig.C.32 – Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

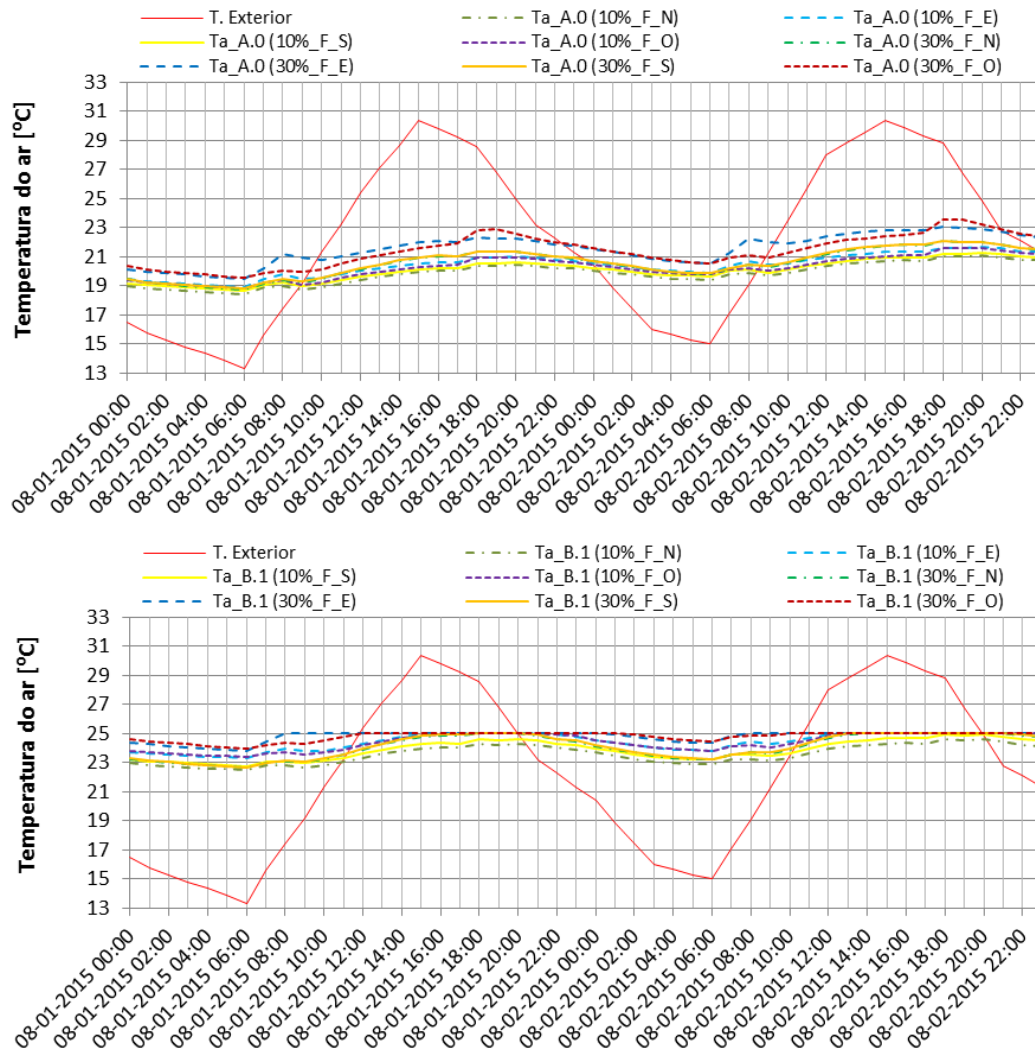


Fig.C.33 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)



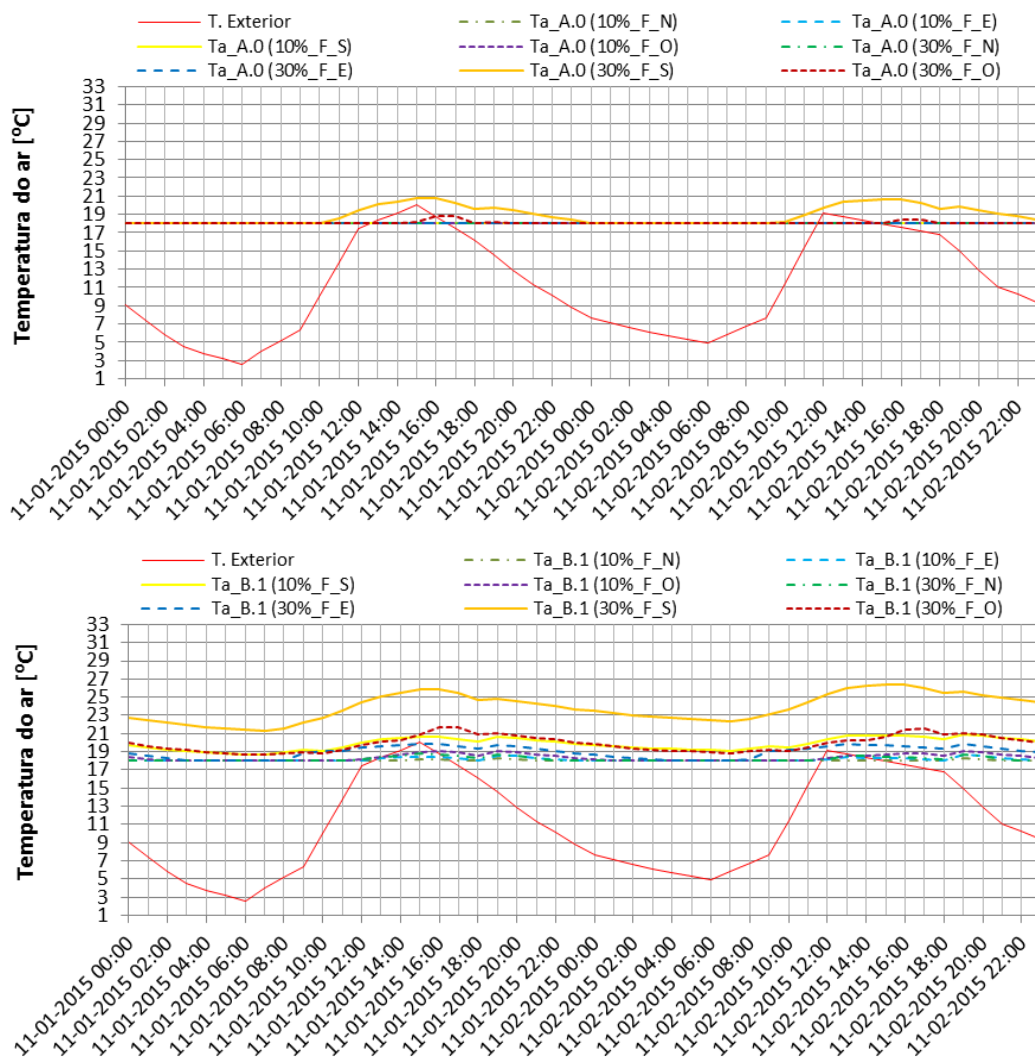


Fig.C.34 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

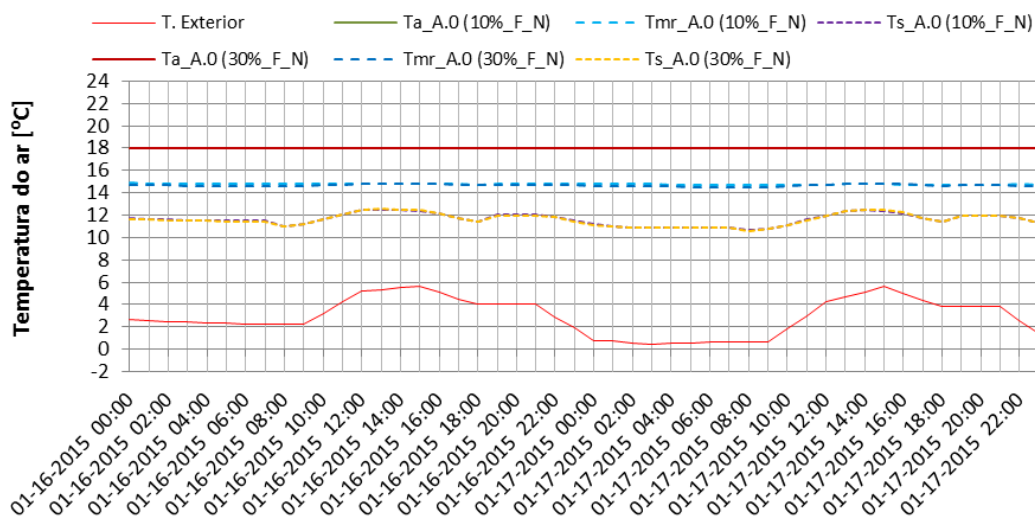


Fig.C.35 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

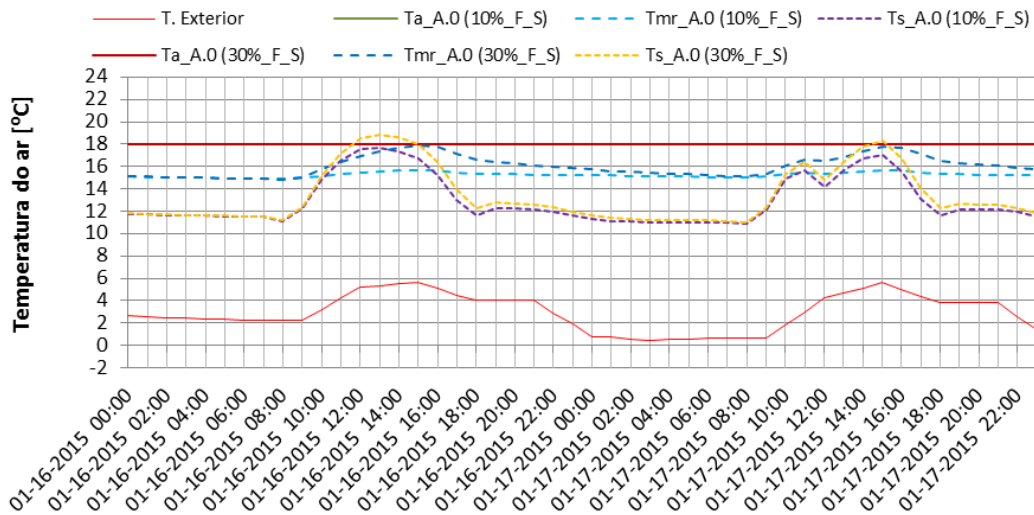


Fig.C.36 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

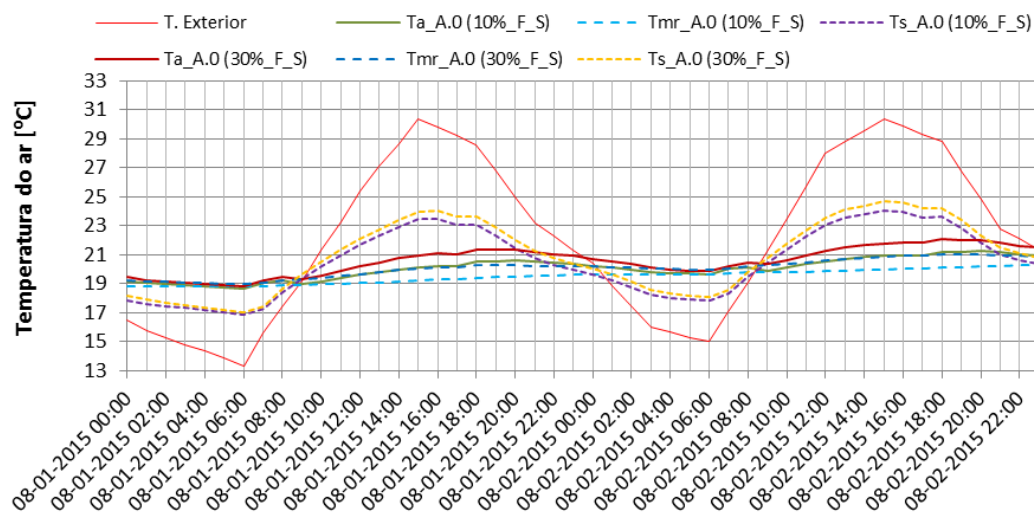
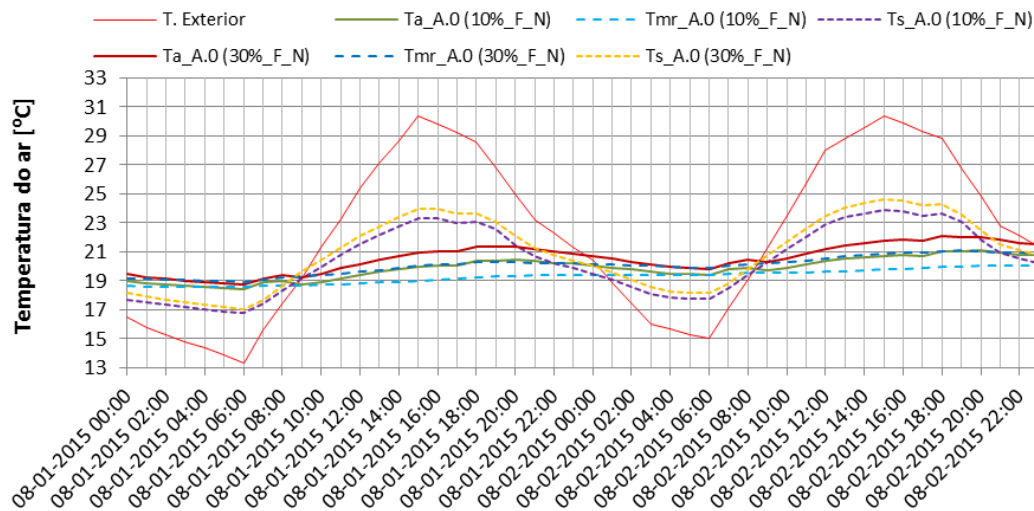


Fig.C.37 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

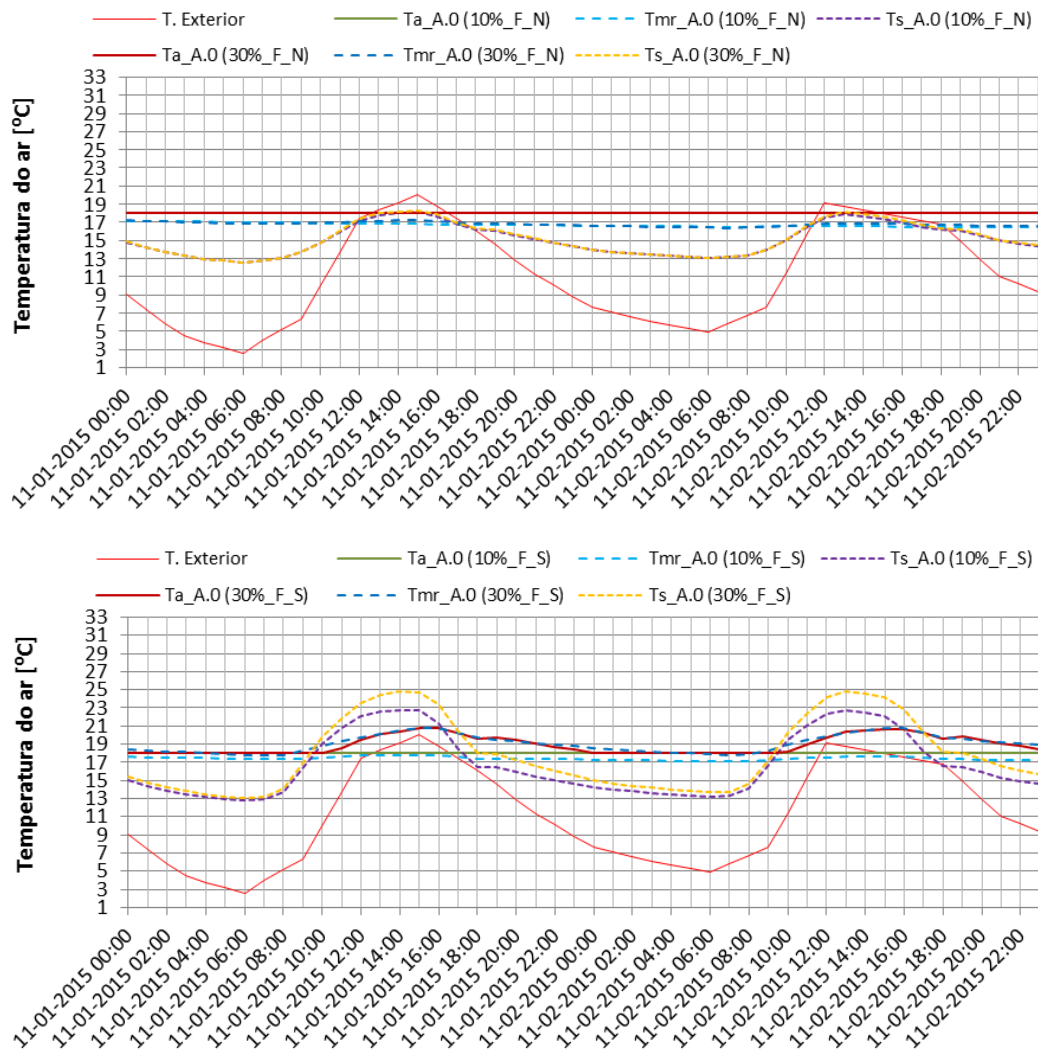


Fig.C.38- Ctic\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

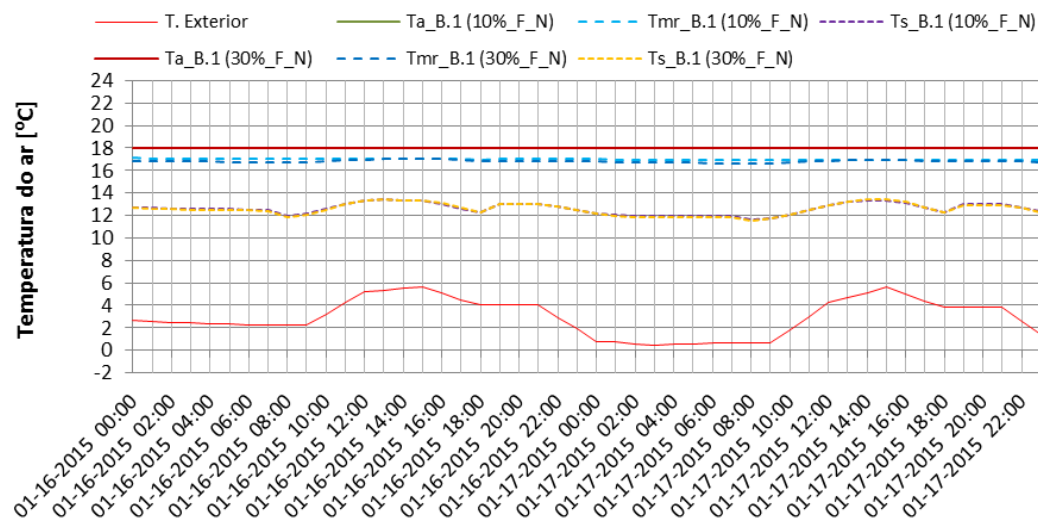


Fig.C.39 - Ctic\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)



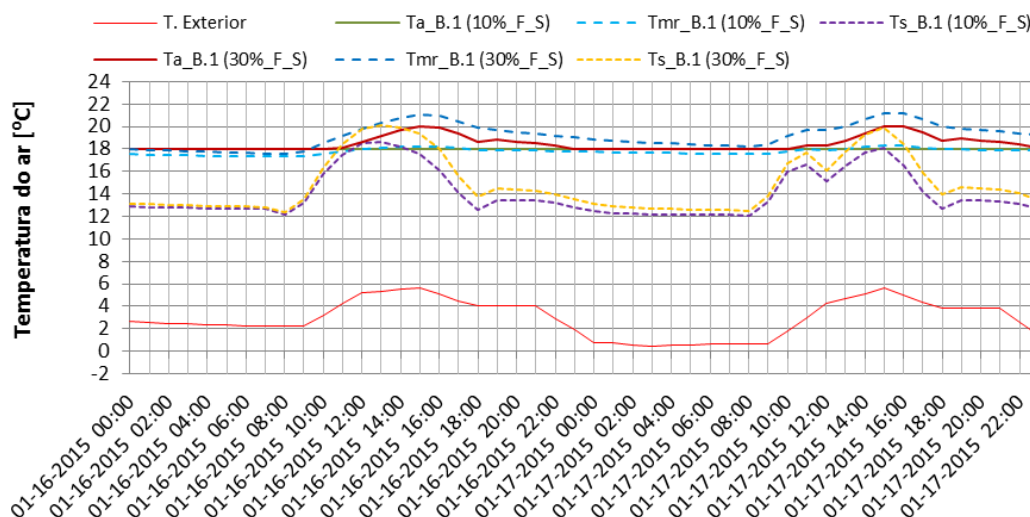


Fig.C.40 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

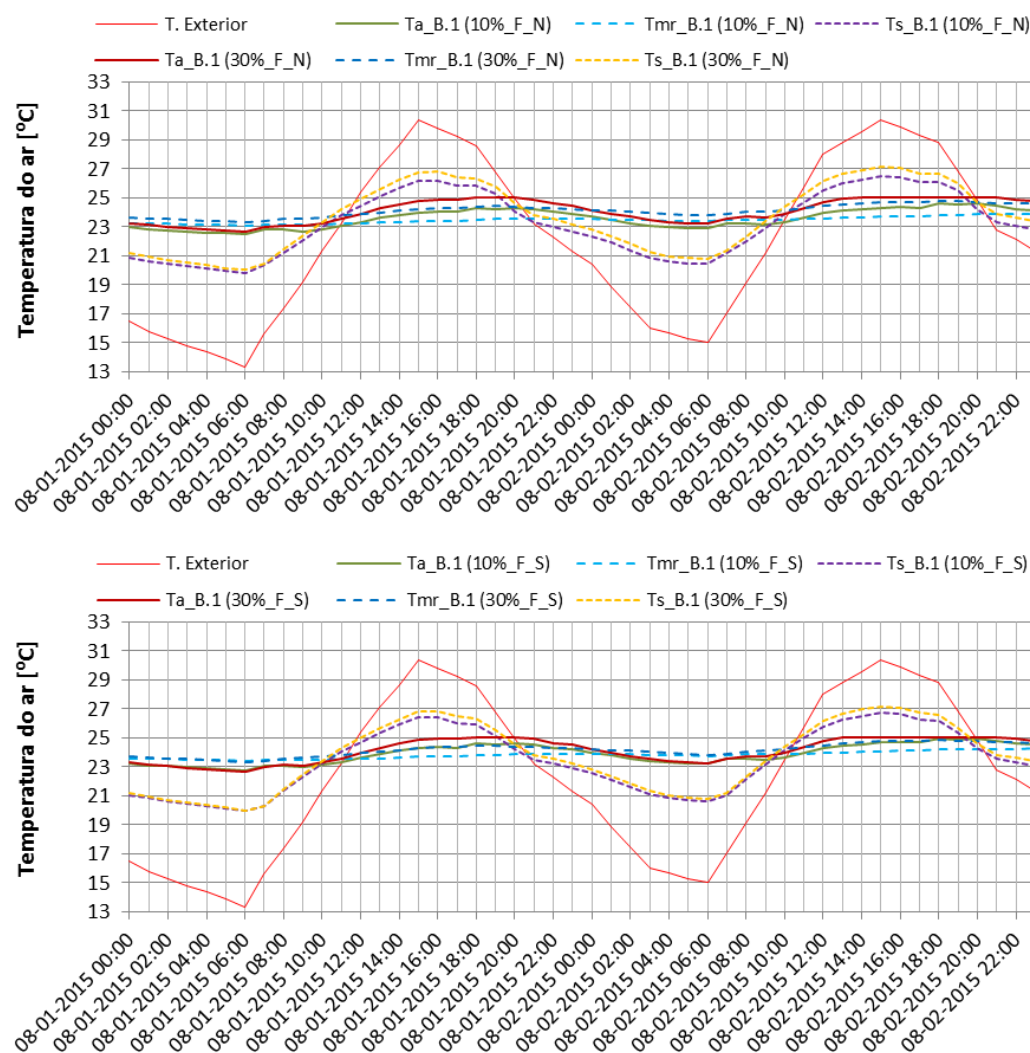


Fig.C.41 - Ctíc\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

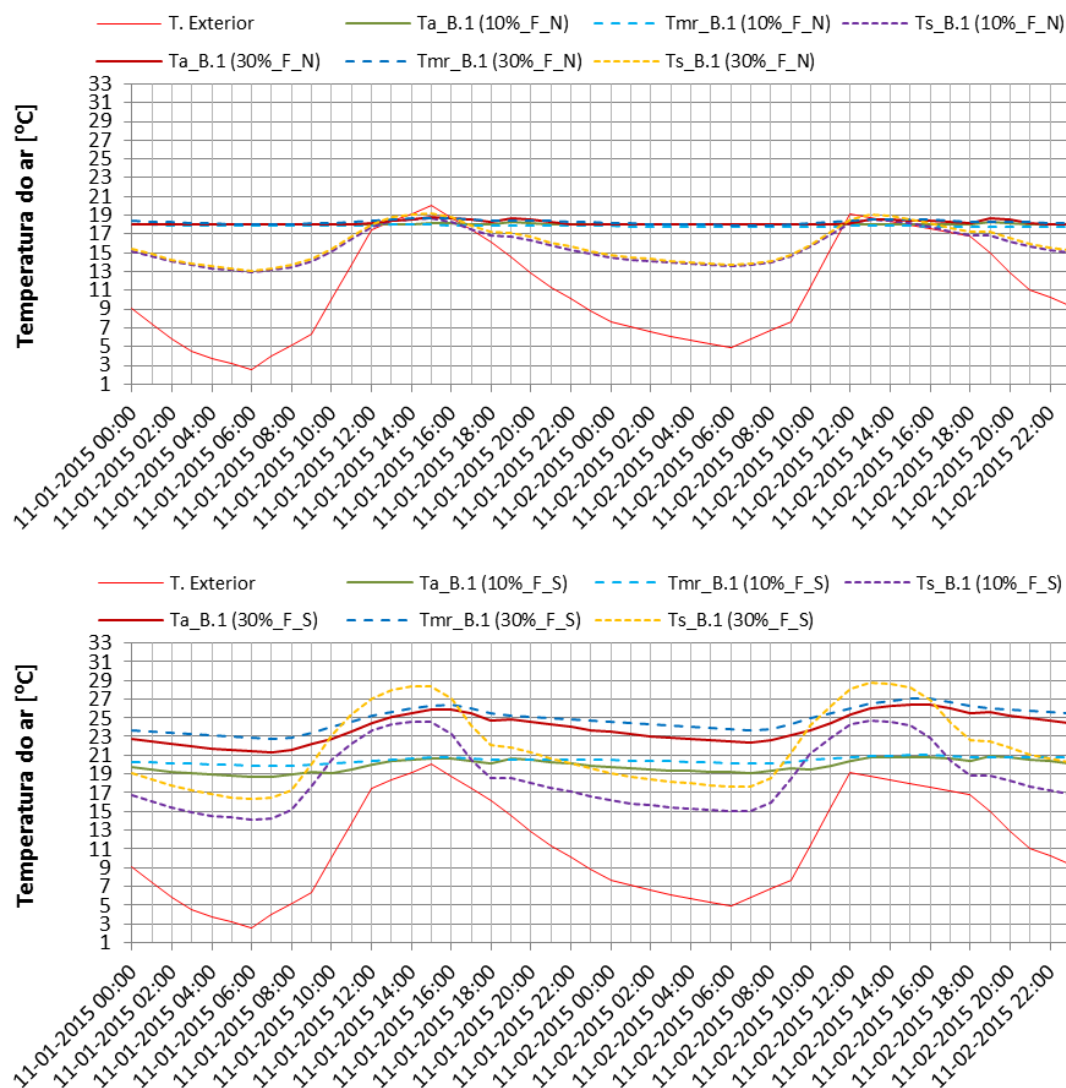


Fig.C.42- Ctic\_F\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

Para a situação com climatização (Ctic), **inércia térmica fraca (f)**, em função da orientação do vão envidraçado e da relação entre a área do vão envidraçado e a área do pavimento de 10% e 30%, nas figuras C.43 e C.44 apresenta-se respetivamente, a comparação anual da variação da temperatura média diária do ar no espaço A.0 (piso 0 – sobre o solo e com duas fachadas) e no espaço B.1 (piso 1 – piso intermédio e com uma fachada), nas figuras C.45 a C.48 apresenta-se respetivamente, a variação horária da temperatura do ar no espaço A.0 e no espaço B.1, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. Nas figuras C.49 a C.56 apresenta-se a variação horária da temperatura do ar ( $T_a$ ), da temperatura média radiante ( $T_{mr}$ ) e da temperatura superficial ( $T_s$ ) no cento do vidro para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno, de Verão e de Outono. É ainda indicada nos gráficos a variação da temperatura exterior.

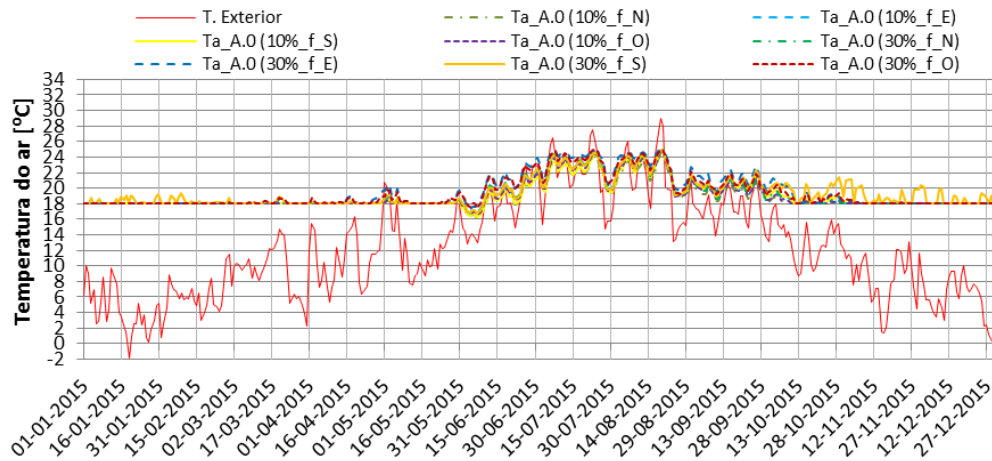


Fig.C.43 - Ctic\_f\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço A.0

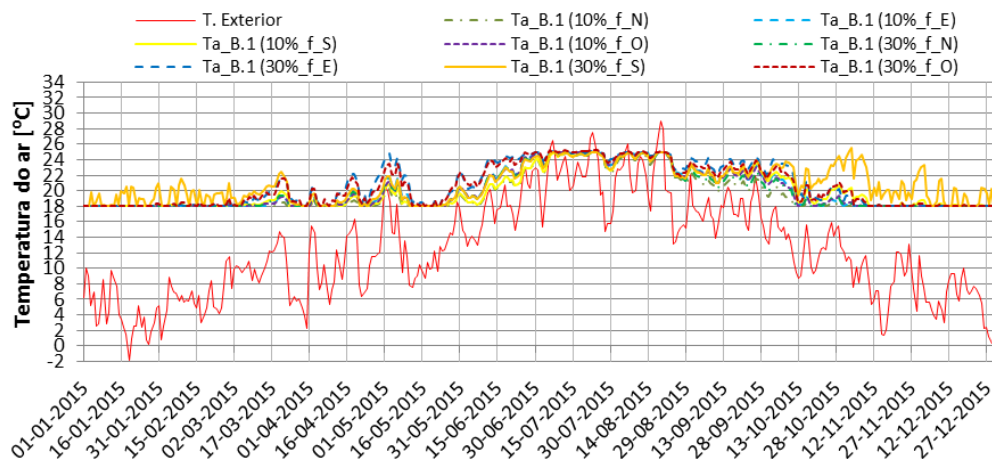


Fig.C.44 - Ctic\_f\_Incolor: Variação ao longo do ano da temperatura média diária do ar no espaço B.1

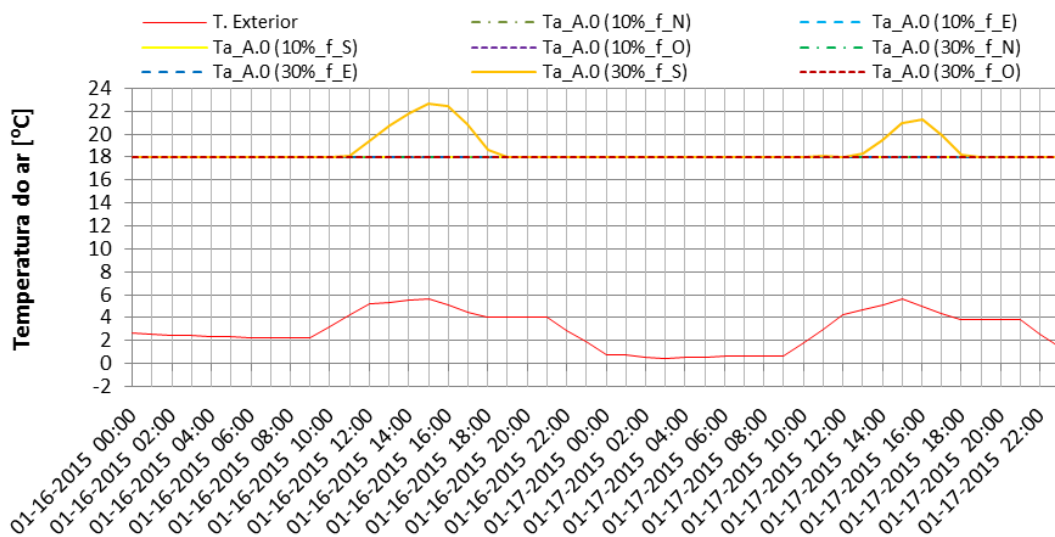


Fig.C.45 – Ctic\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

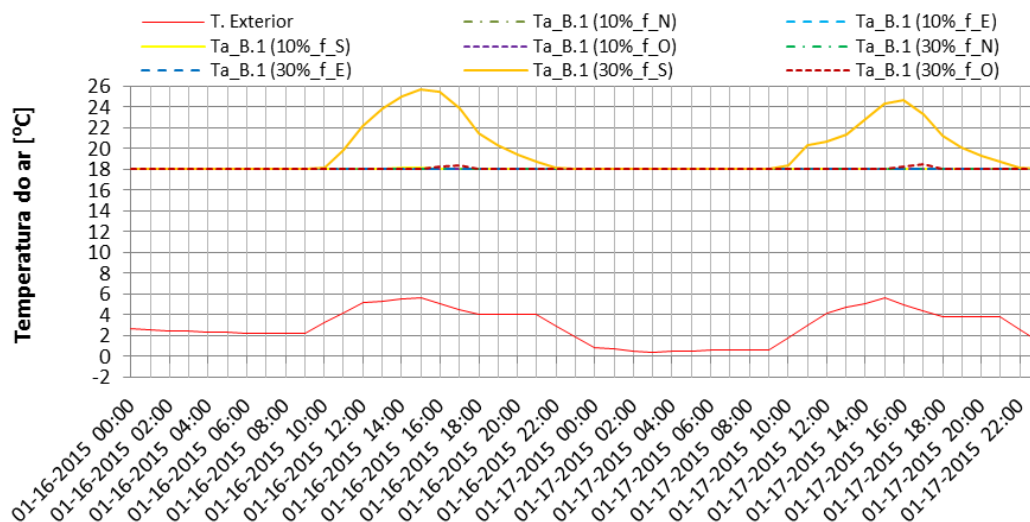


Fig.C.46 – Ctic\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

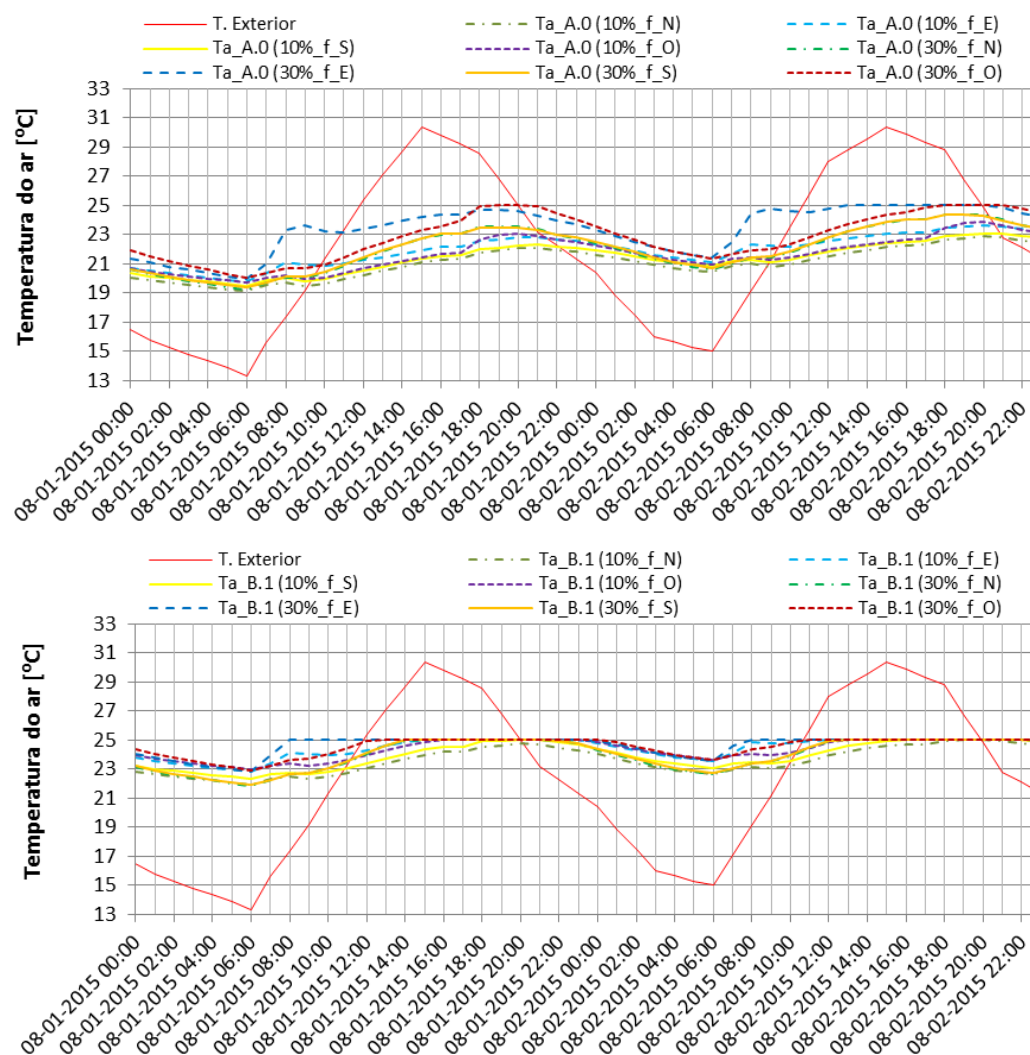


Fig.C.47 - Ctic\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

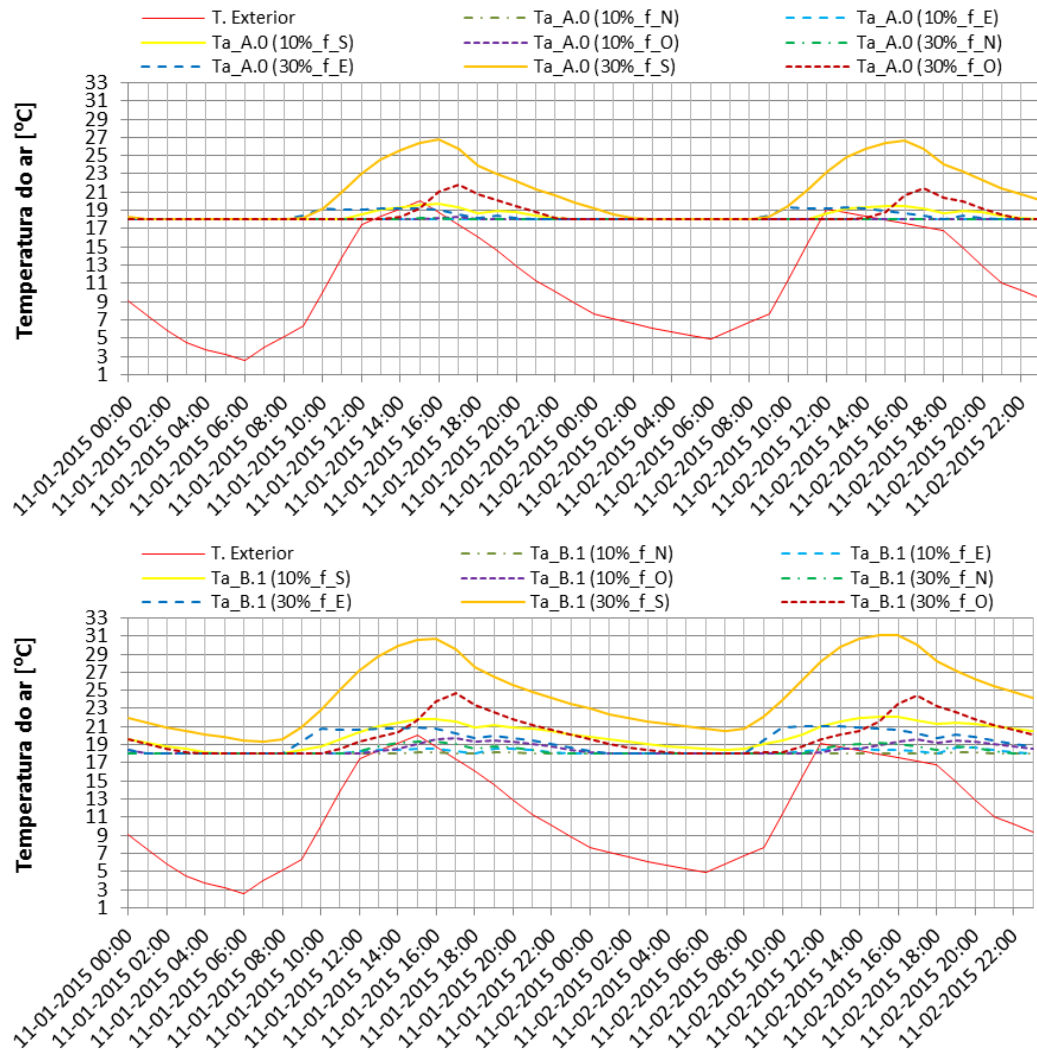


Fig.C.48 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar nos espaços A.0 e B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

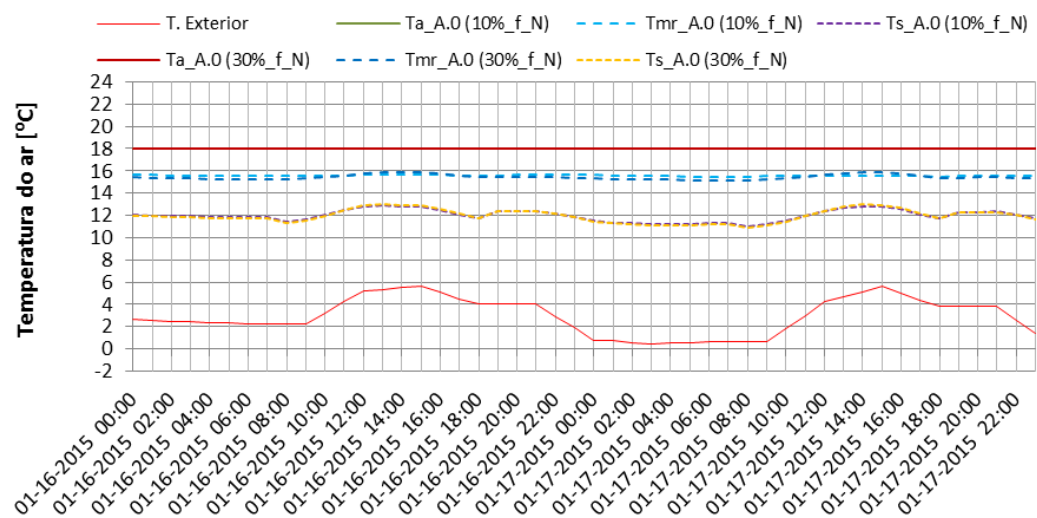


Fig.C.49 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)



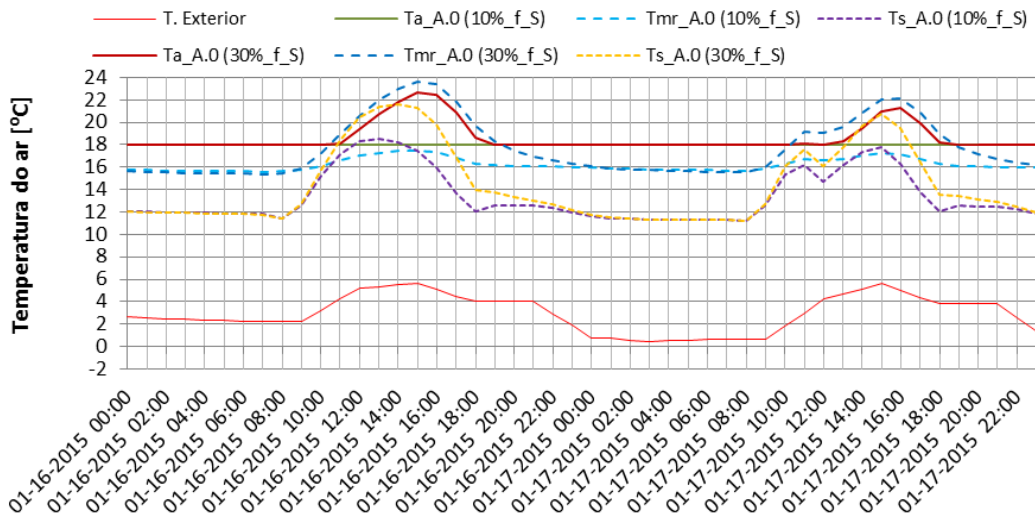


Fig.C.50 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço A.0, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

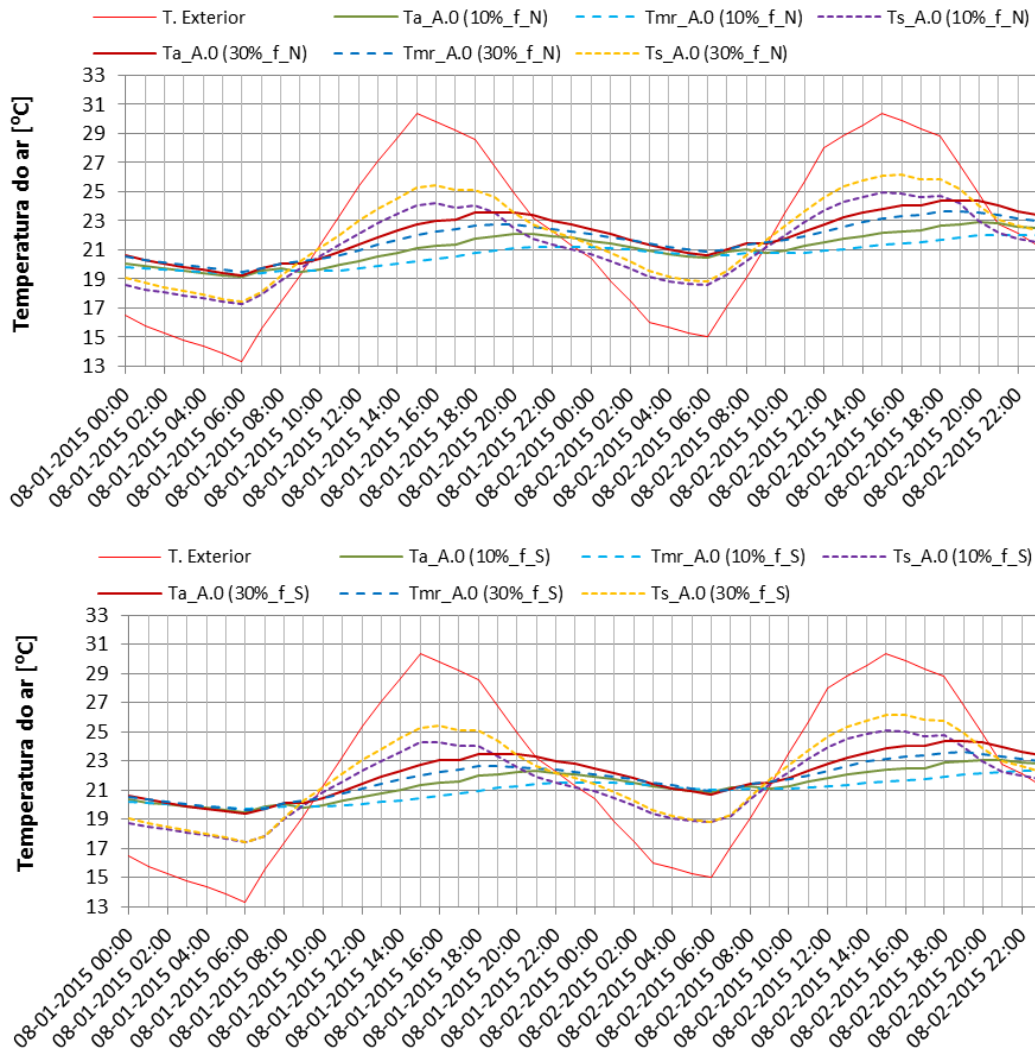


Fig.C.51 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)

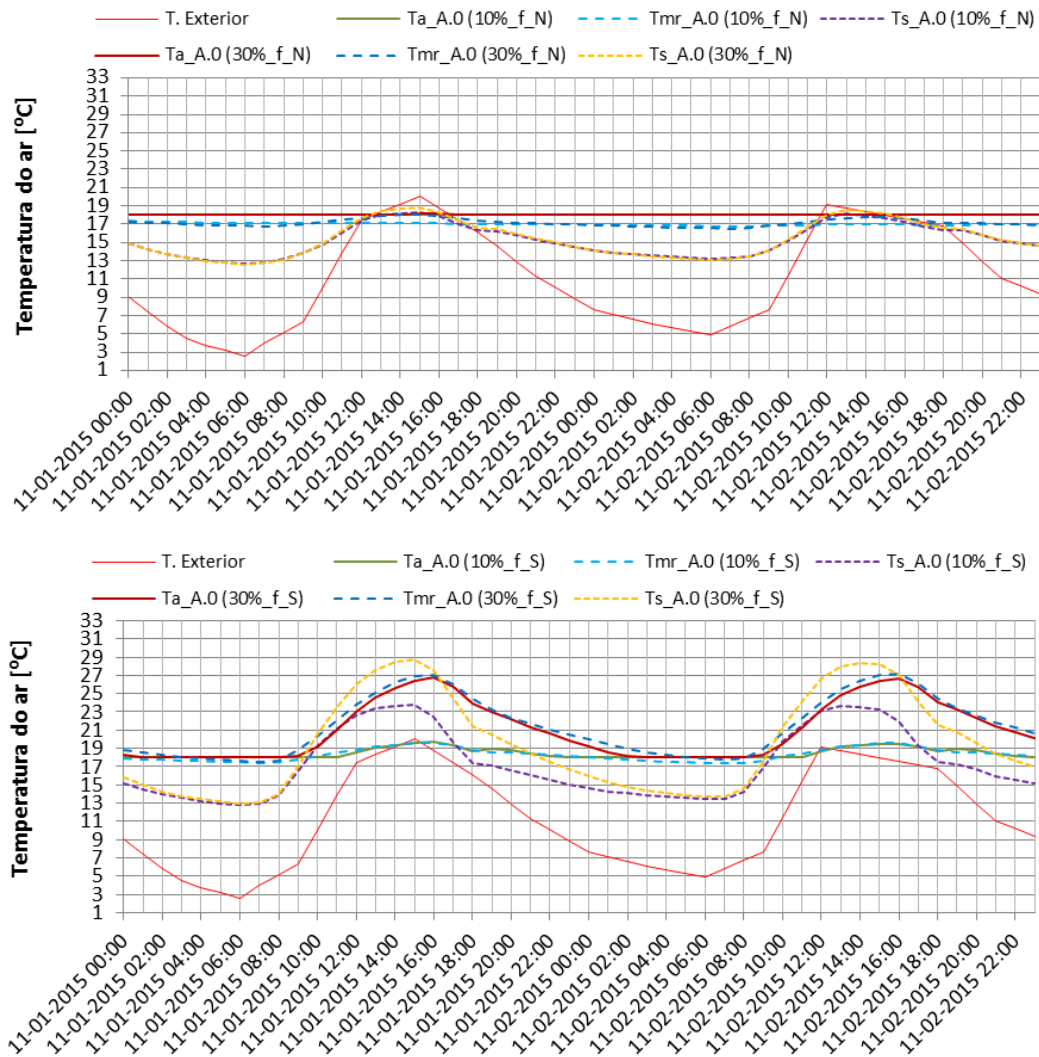


Fig.C.52 - Ctic\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar, da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço A.0, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)

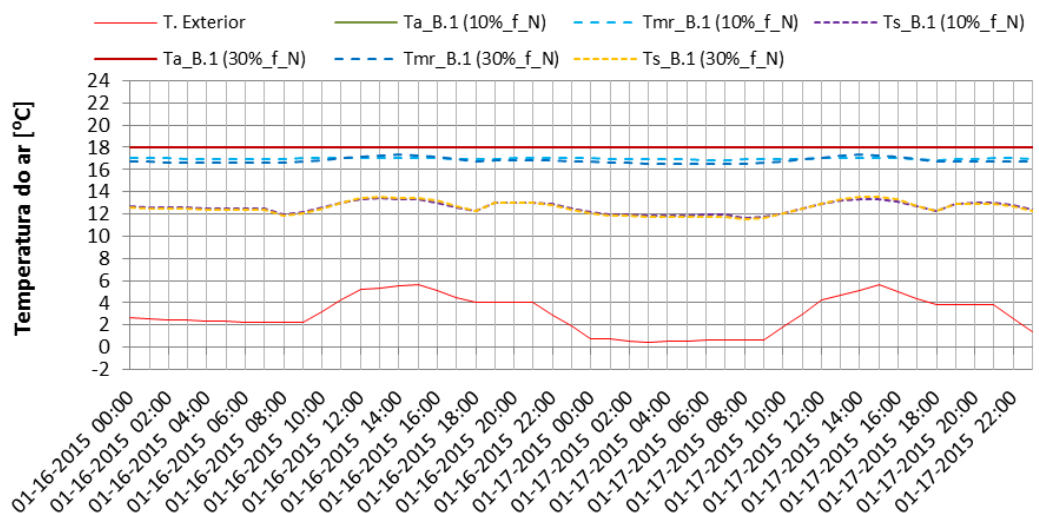


Fig.C.53 - Ctic\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

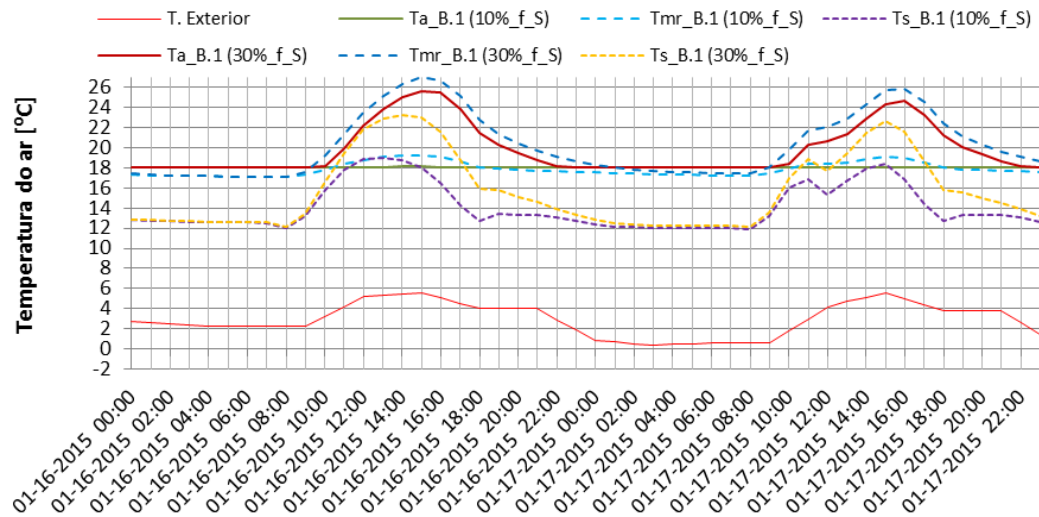


Fig.C.54 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Sul no espaço B.1, para dois dias de Inverno (16 e 17 de janeiro)

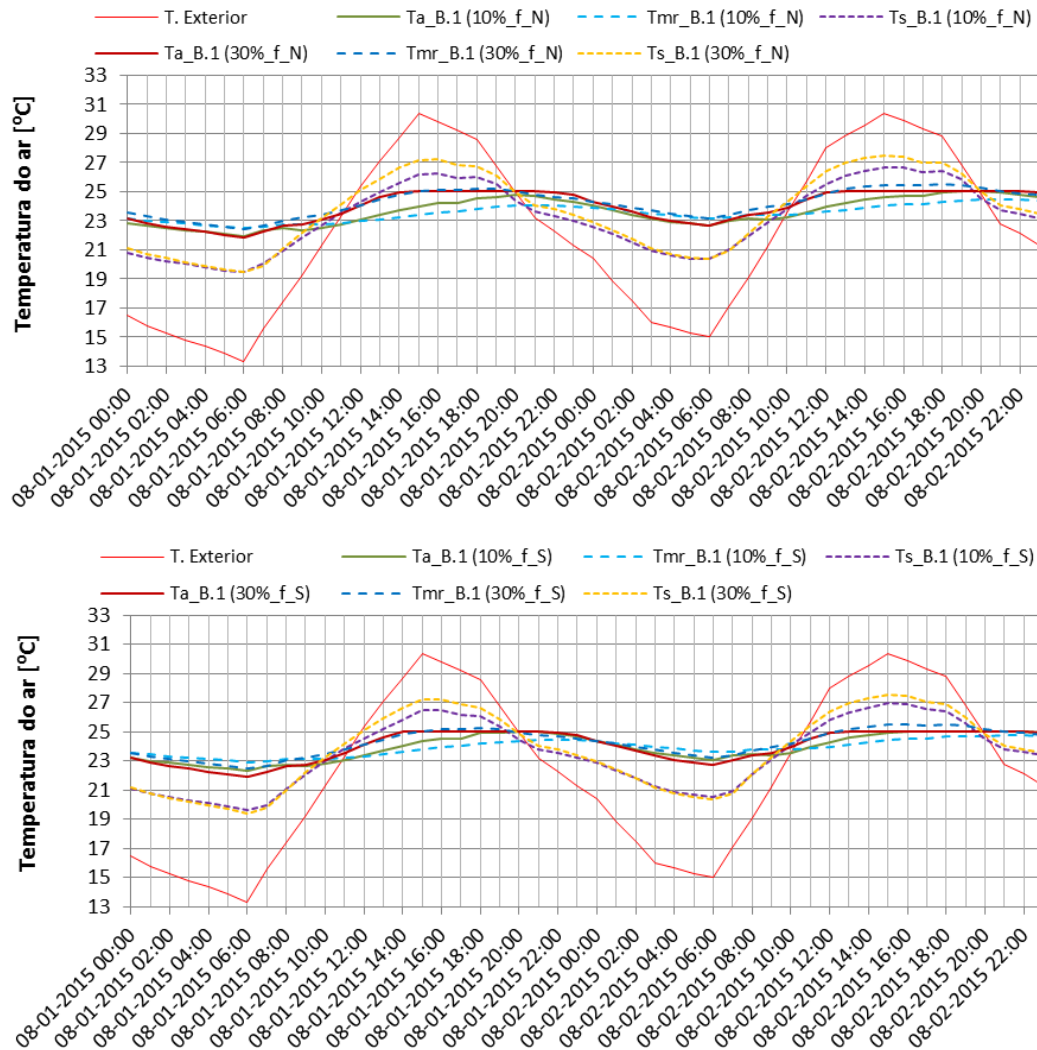


Fig.C.55 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Verão (01 e 02 de agosto)



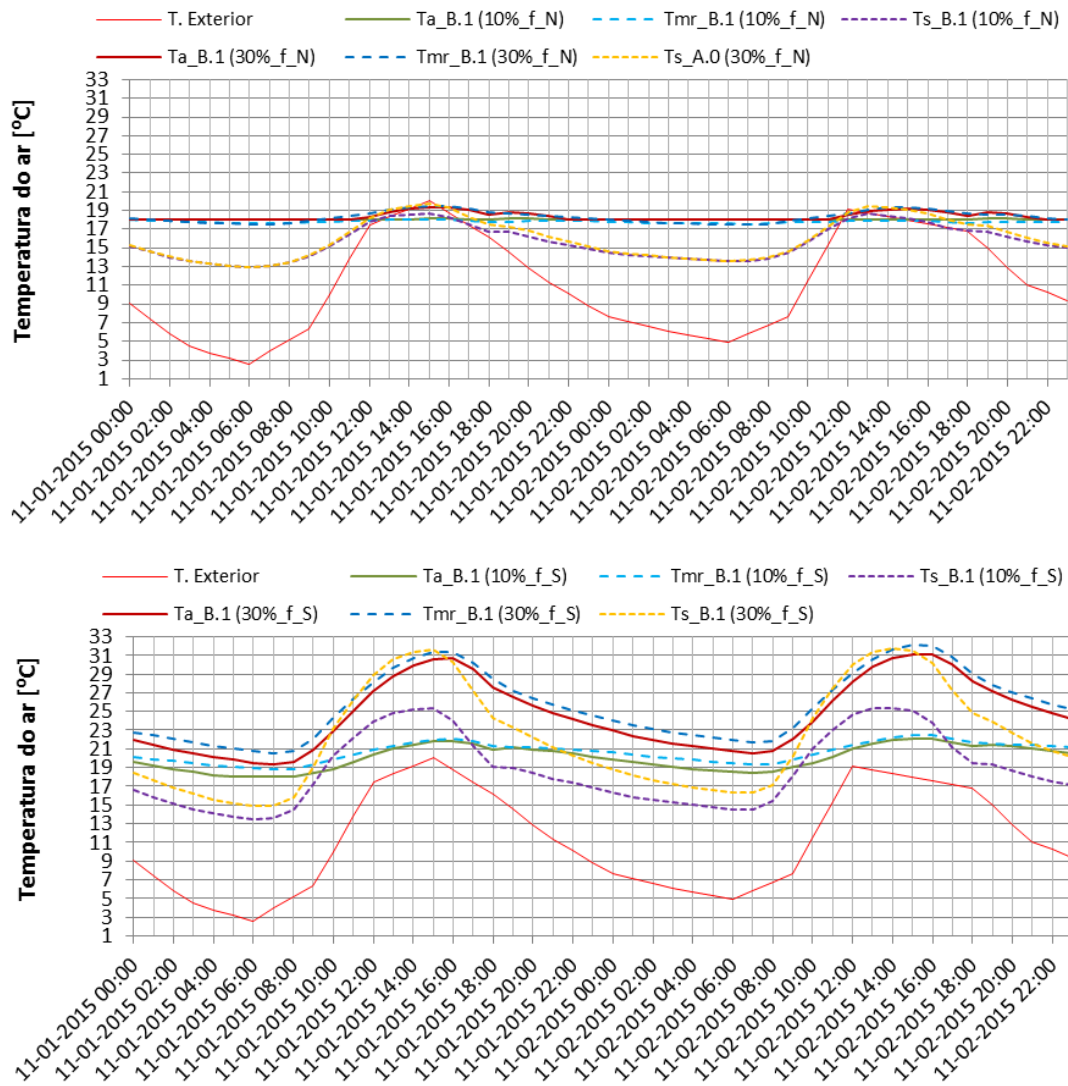


Fig.C.56 - Ctíc\_f\_Incolor: Variação horária da temperatura do ar, da  $T_a$ , da  $T_{mr}$  e da  $T_s$  para os vãos envidraçados orientados a Norte e a Sul no espaço B.1, para dois dias de Outono (01 e 02 de novembro)



# Anexo D

## INTERFACE GRÁFICA – PROGRAMA QlikView

### D.1. – INTRODUÇÃO

O programa QlikView [141] é uma ferramenta de *Business Intelligence* (BI) vocacionada para a análise de grandes quantidades de dados, através de gráficos, diagramas e tabelas, apresentando uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização. Essa interface gráfica foi criada na sua totalidade em função do nosso objetivo, que é, apresentação e análise dos resultados de todas as funções de avaliação do desempenho no total de 20 (controlo da temperatura interior: sem climatização 10 e com climatização 10) com 1 119 744 linhas de dados. Para isso foram criadas as pastas que a seguir se apresentam, tendo em considerando o tipo de sistema de controlo da temperatura interior (Cti).

De um modo geral em cada pasta estão representadas as variáveis consideradas (sete características do espaço e sete características do vão envidraçado) e as respetivas opções e a apresentação por via gráfica dos resultados obtidos para cada função de avaliação do desempenho. As caixas onde estão inseridas as opções relativas a cada variável, podem apresentar três cores, a branco quando as opções fazem parte da solução, a cinza quando é uma das opções não faz parte da solução e verde quando a opção está selecionada, figura D.1, sem qualquer opção selecionada, figura D.2, com as opções relativas a todas as variáveis selecionadas. Por exemplo, quando para determinada variável nenhuma opção está selecionada, todas apresentam a cor branca, porque todas as opções podem fazer parte da solução, mas ao selecionar uma opção as outras opções ficam a cinza, porque deixam de fazer parte da solução. Isto é, em cada variável só uma opção pode fazer parte da solução. Para a seleção de uma das opções para cada uma das variáveis consideradas o utilizador pode clicar sobre essa opção ou selecionar essa opção no gráfico.

Nos gráficos os resultados das funções de avaliação do desempenho são apresentados em colunas os valores máximos, mínimos (também podem ser apresentados por linhas) e os valores médios são apresentados através de uma linha para marcar a tendência entre várias opções. Para cada localização geográfica, é ainda apresentado um gráfico com a indicação da relação entre o valor máximo relativo as opções selecionadas e o valor máximo tendo em consideração a pior solução, figura D.3. Nos gráficos é possível escolher qual a variável a analisar, ao clicar numa opção na opção é apresentado um novo gráfico para outra variável e assim sucessivamente, e a qualquer momento é possível retroceder clicando na seta que se encontra junto ao nome da variável. É ainda apresentada uma caixa estatística com a indicação da contagem total de combinações (em relação às opções que não estão selecionadas) e os valores máximos, mínimos e médias em relação a essas combinações, se todas as opções estiverem selecionadas o valor indicado para a contagem total será 1, figura D.4.

Caraterísticas do Espaço						Caraterísticas do Vão Envidraçado				
Localização						Orientação				
Bragança		Évora		Porto		Norte		Este	Sul	Oeste
Espaço						Sombreamento por Elementos Exteriores				
A.0	A.1	A.2	B.0	B.1	B.2	Elemento Horizontal		Elementos Verticais		Sem Sombreamento
Profundidade						Relação Aenv/ Apav				
Prof1		Prof2		Prof3		10%		15%		30%
Inércia Térmica						Dispositivos de Proteção Solar				
Forte			Frac			Proteção Exterior		Proteção Interior		Sem Proteção
Cor Fachada						Caixilho				
Clara			Escura			Al sem Corte Térmico			Al com Corte Térmico	
Espessura do Isolamento						Tipo de Vidro				
I_3/6 cm			I_6/12 cm			Vidro Duplo			Vidro Simples	
Ventilação						Caraterísticas do Vidro				
Ra1		Ra2				Incolor		Verde		LoE

Fig.D.1. – Apresentação das variáveis e as respetivas opções na Interface Gráfica criada no programa QlikView, sem qualquer seleção

Caraterísticas do Espaço						Caraterísticas do Vão Envidraçado						
Localização						Orientação						
Bragança		Évora		Porto		Norte		Este	Sul	Oeste		
Espaço						Sombreamento por Elementos Exteriores						
A.0		A.1	A.2	B.0		B.1	B.2	Elemento Horizontal			Elementos Verticais	Sem Sombreamento
Profundidade						Relação Aenv/Apav						
Prof1			Prof2		Prof3		10%		15%		30%	
Inércia Térmica						Dispositivos de Proteção Solar						
Forte				Frac		Proteção Exterior			Proteção Interior		Sem Proteção	
Cor Fachada						Caixilho						
Clara				Escura		Al sem Corte Térmico			Al com Corte Térmico			
Espessura do Isolamento						Tipo de Vidro						
I_3/6 cm			I_6/12 cm			Vidro Duplo			Vidro Simples			
Ventilação						Caraterísticas do Vidro						
Ra1			Ra2			Incolor		Verde		LoE		

Fig.D.2. – Apresentação das variáveis e as respetivas opções na Interface Gráfica criada no programa QlikView, com todas as variáveis selecionadas

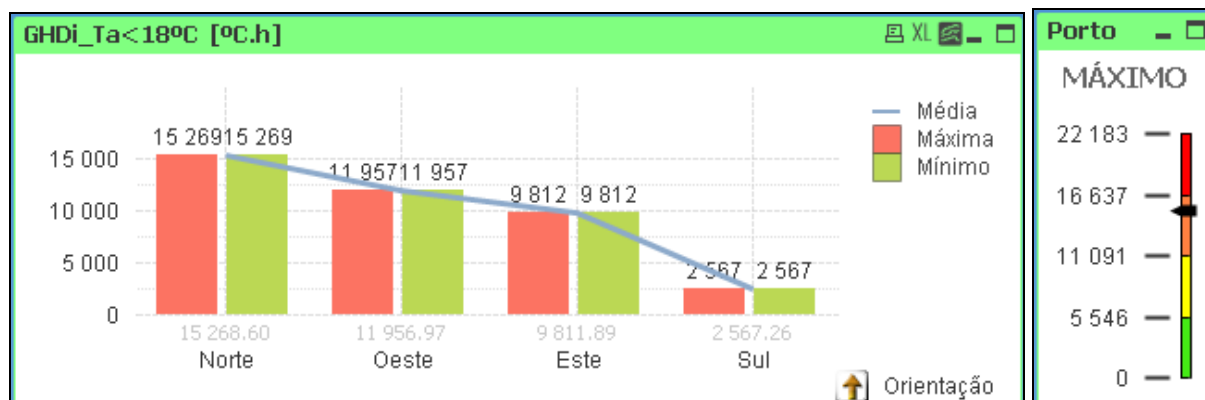


Fig.D.3. – Gráficos para apresentação dos resultados das funções de avaliação do desempenho

Contagem total	4
Média	9 901.18
Mínimo	2 567.26
Máximo	15 268.60

Fig.D.4. – Caixa estatística para apresentação dos resultados das funções de avaliação do desempenho

## D.2. – CONTROLO DA TEMPERATURA INTERIOR: SEM CLIMATIZAÇÃO (CTIS)

Para a situação sem climatização (Ctis), foram criadas as pastas apresentadas nas figuras D.5 a D.9.

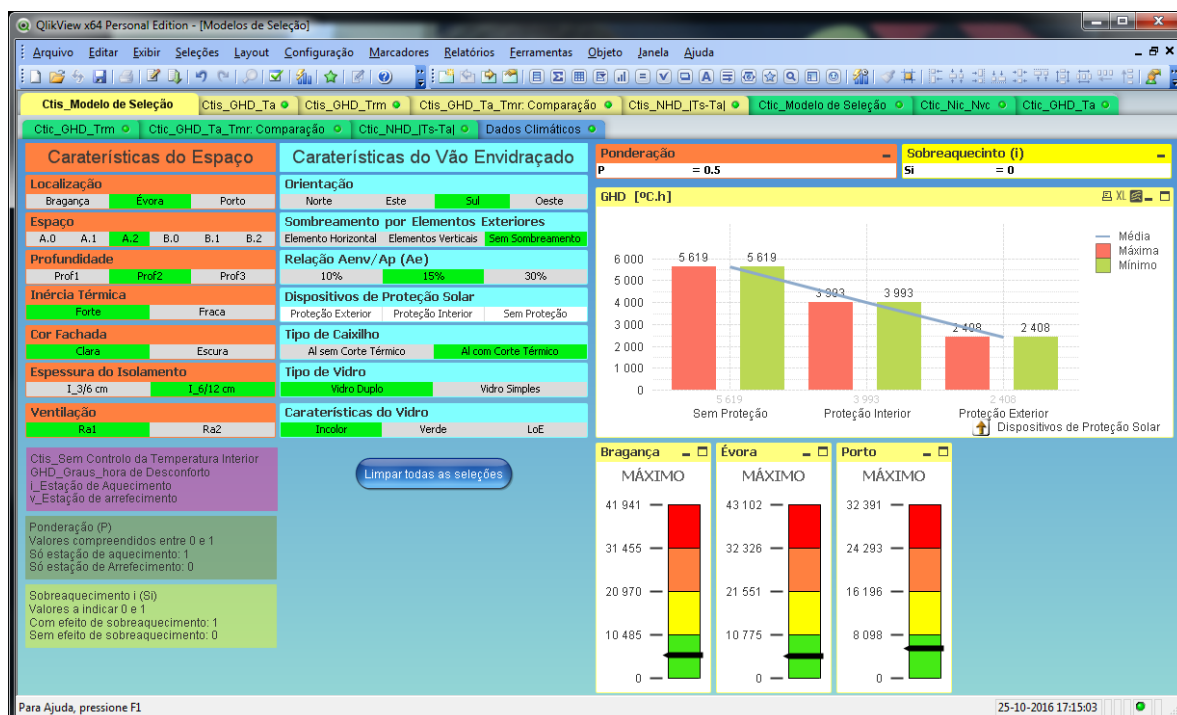


Fig.D.5. – Pasta: Ctis\_Modelo de Seleção

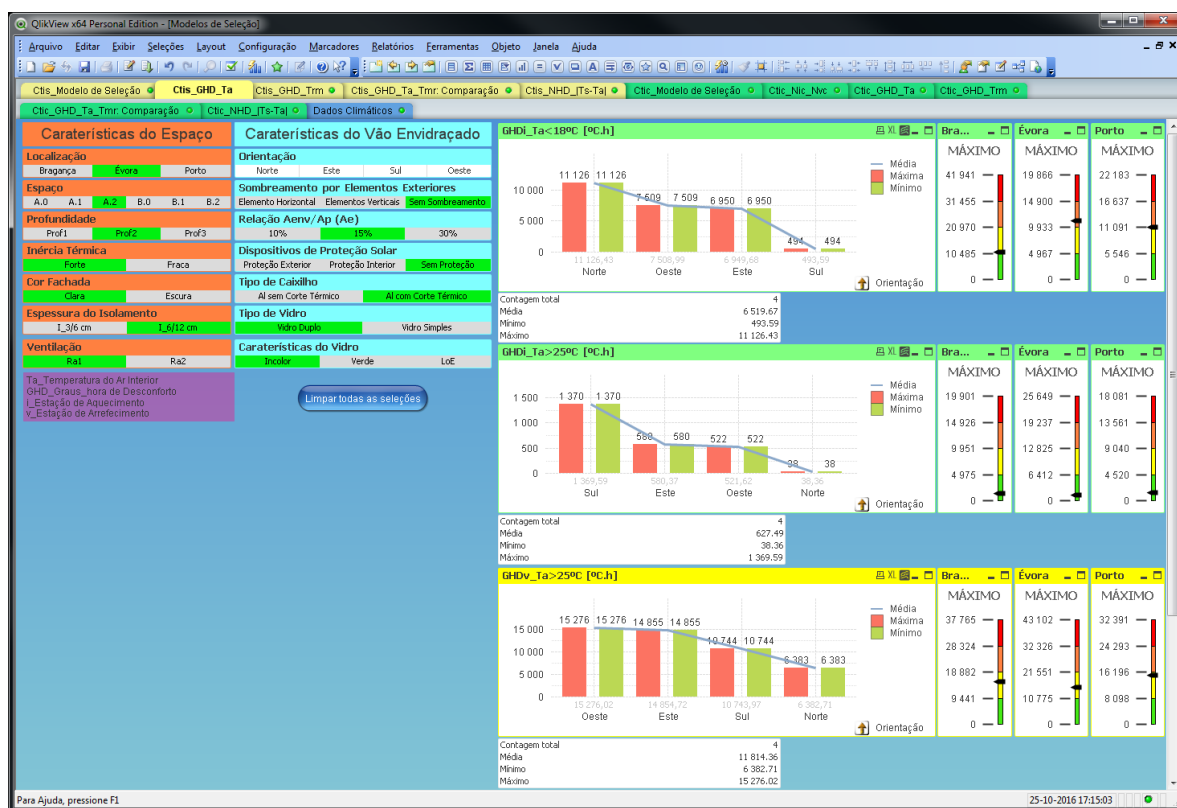


Fig.D.6. – Pasta: Ctis\_GHD-Ta

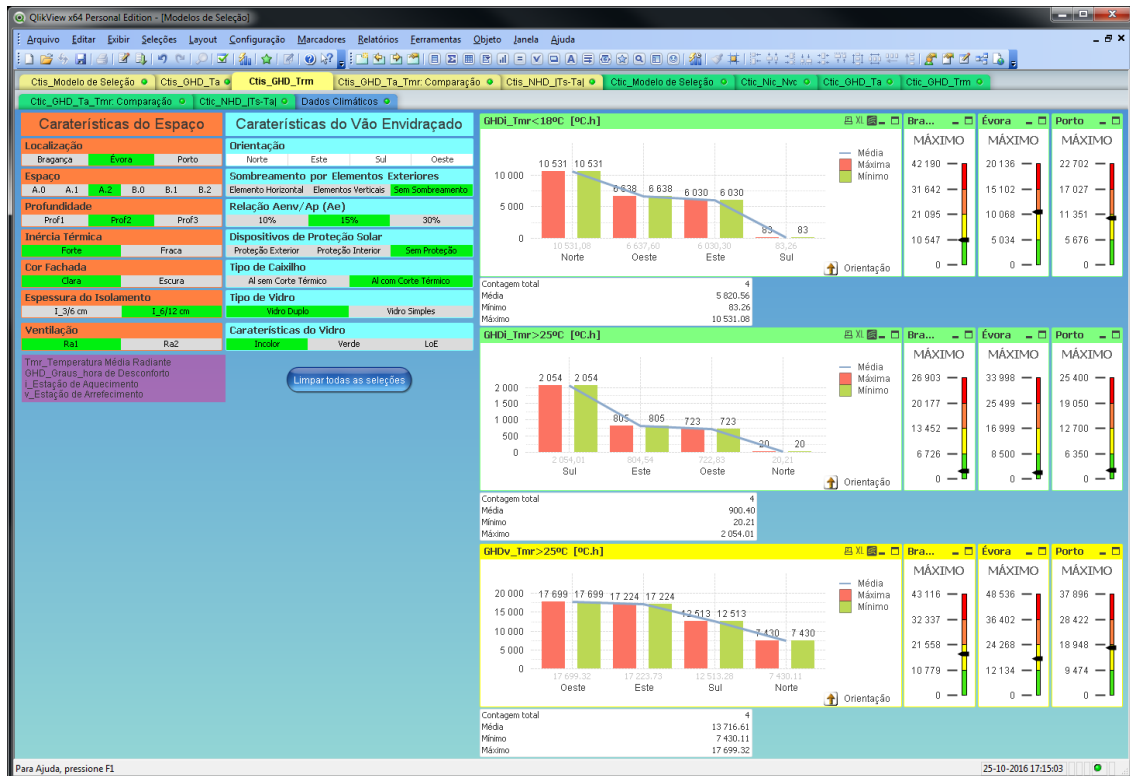


Fig.D.7. – Pasta: Ctis\_GHD\_Tmr

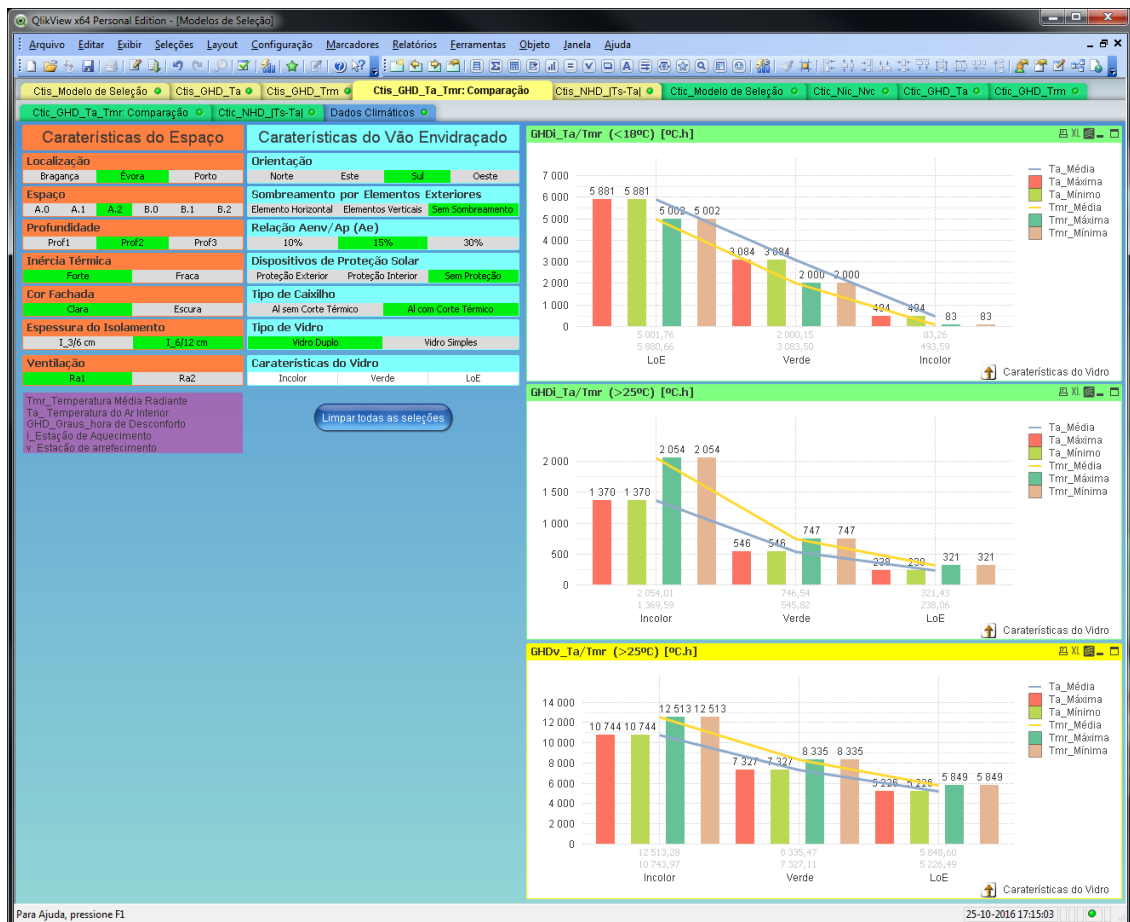


Fig.D.8. – Pasta: Ctis\_GHD-Ta\_Tmr: Comparação

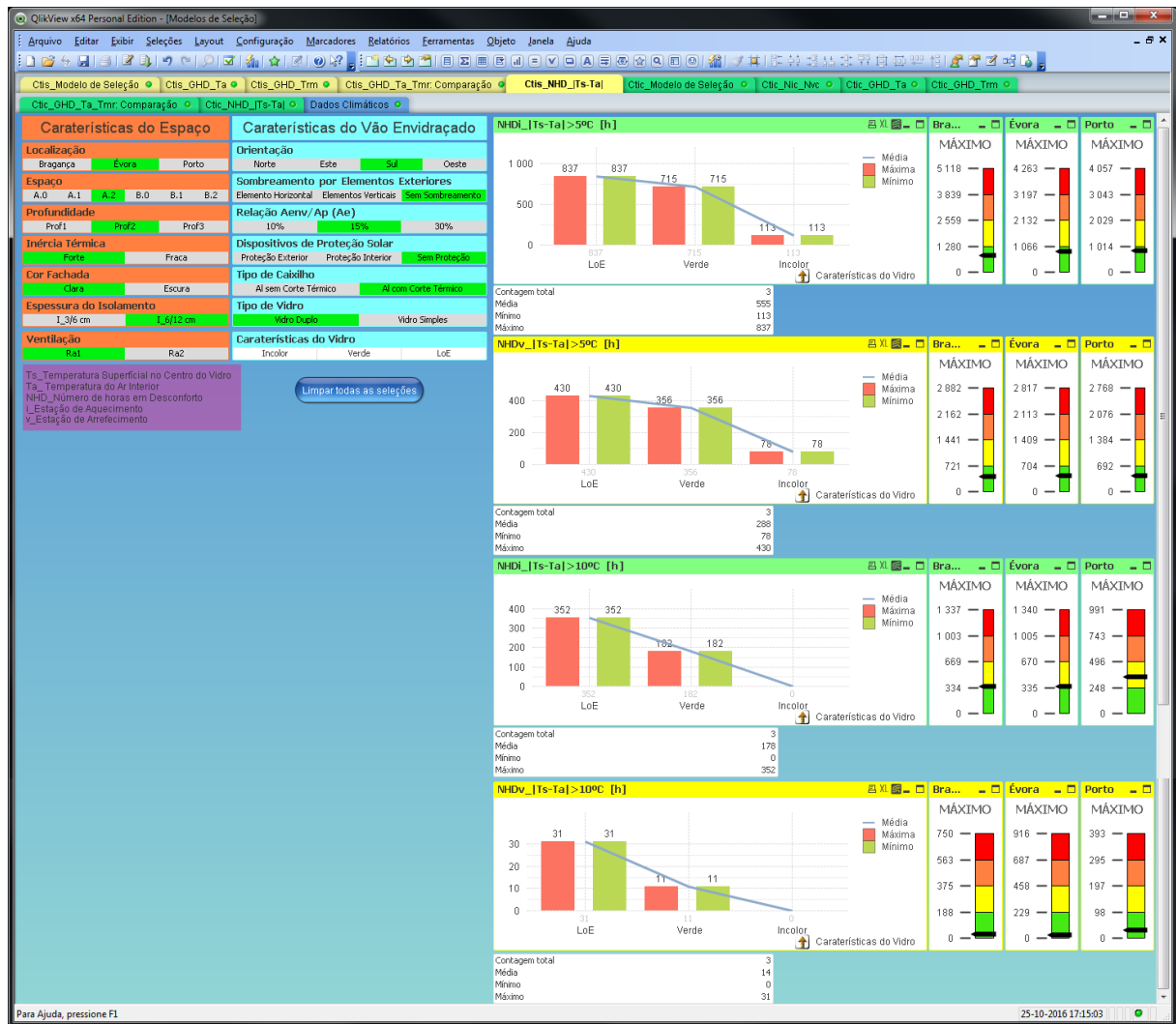


Fig.D.9. – Pasta: Ctis\_NHD\_[Ts-Ta]

### D.3. – CONTROLO DA TEMPERATURA INTERIOR: COM CLIMATIZAÇÃO (CTIC)

Para a situação com climatização (Ctic), foram criadas as pastas apresentadas nas figuras D.10 a D.15.



Fig.D.10. – Pasta: Ctic\_Modelo de Seleção

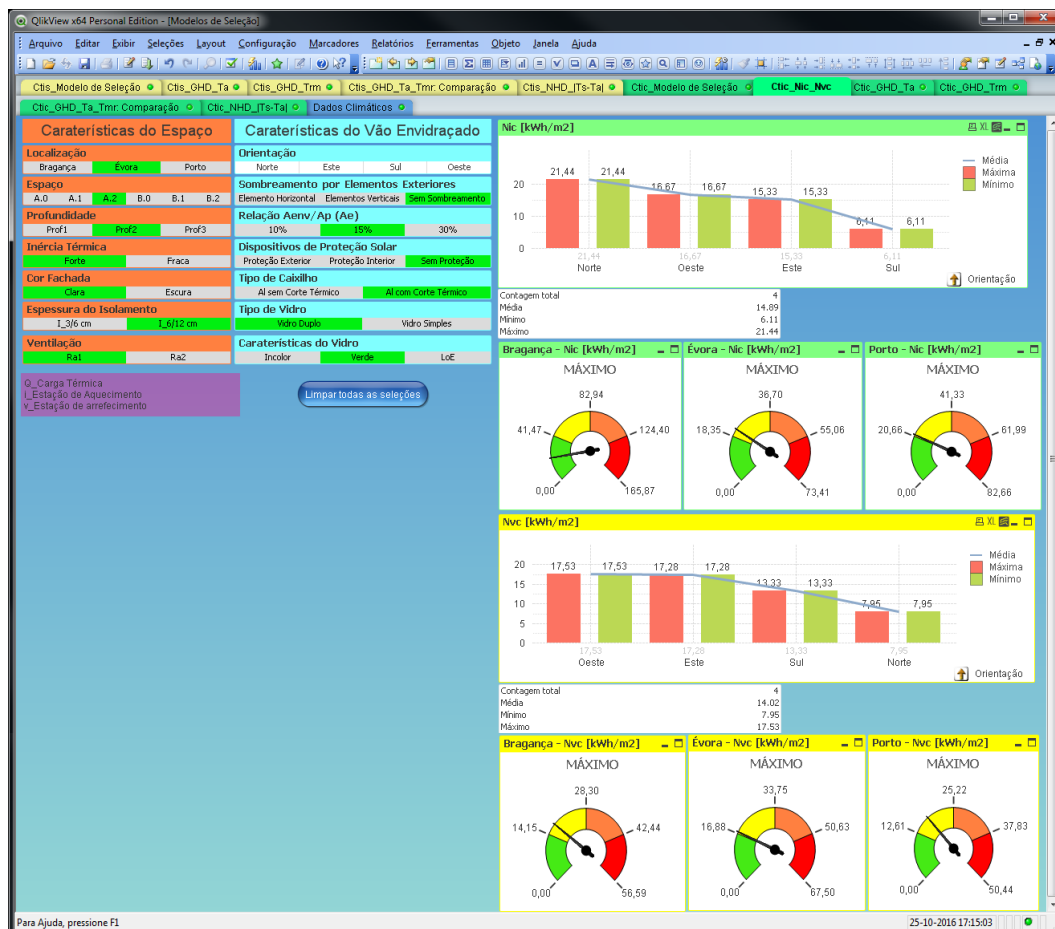


Fig.D.11. – Pasta: Ctic\_Nic\_Nvc



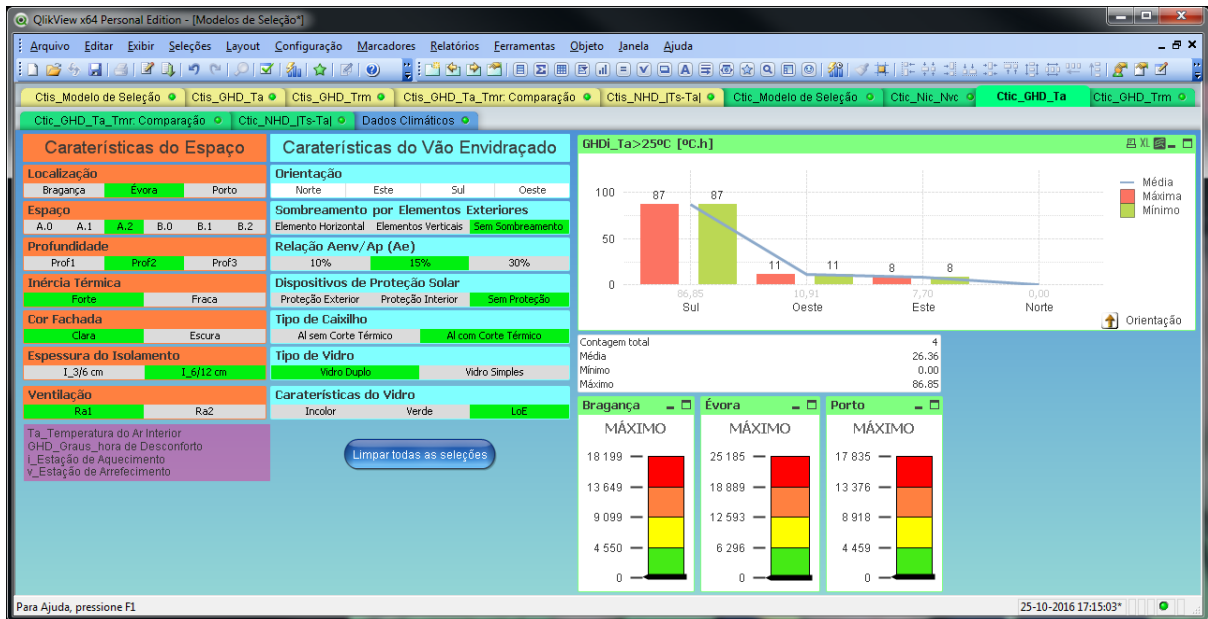


Fig.D.12. – Pasta: Ctic\_GHD\_Ta

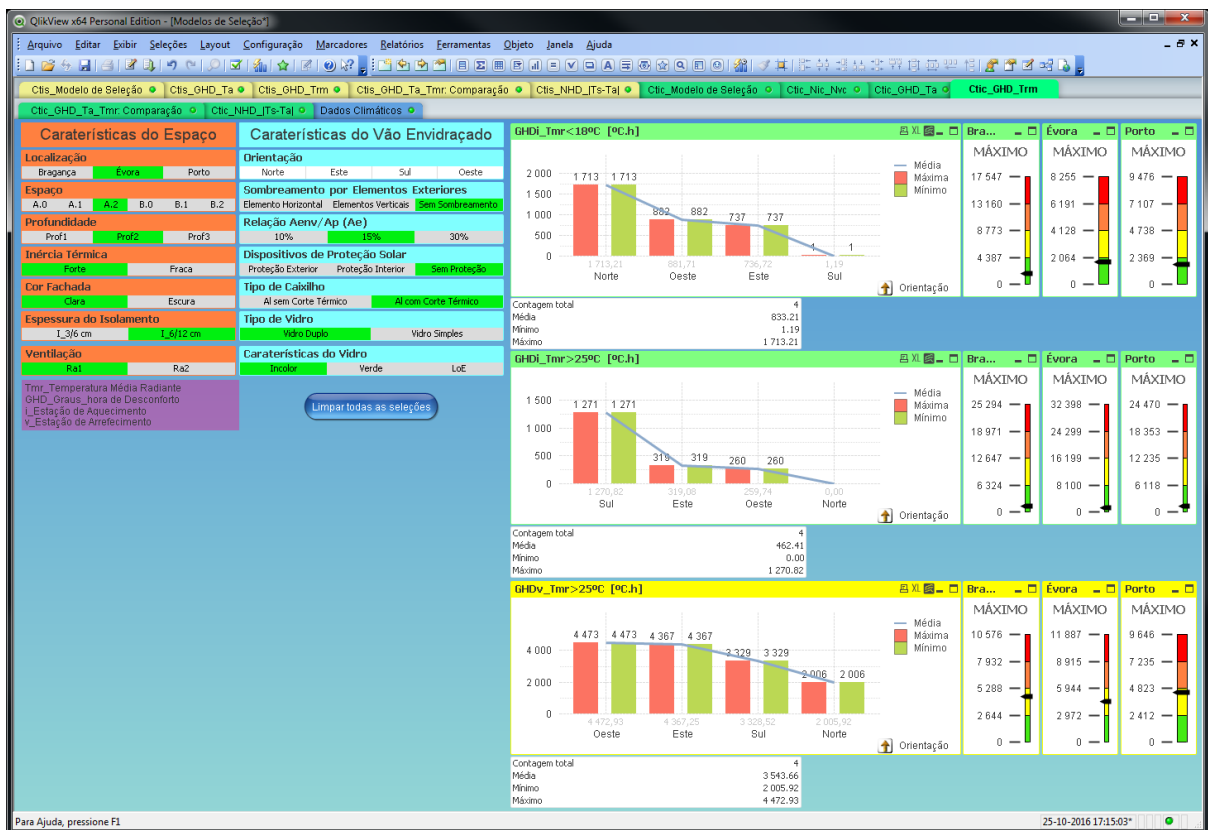


Fig.D.13. – Pasta: Ctic\_GHD\_Tmr

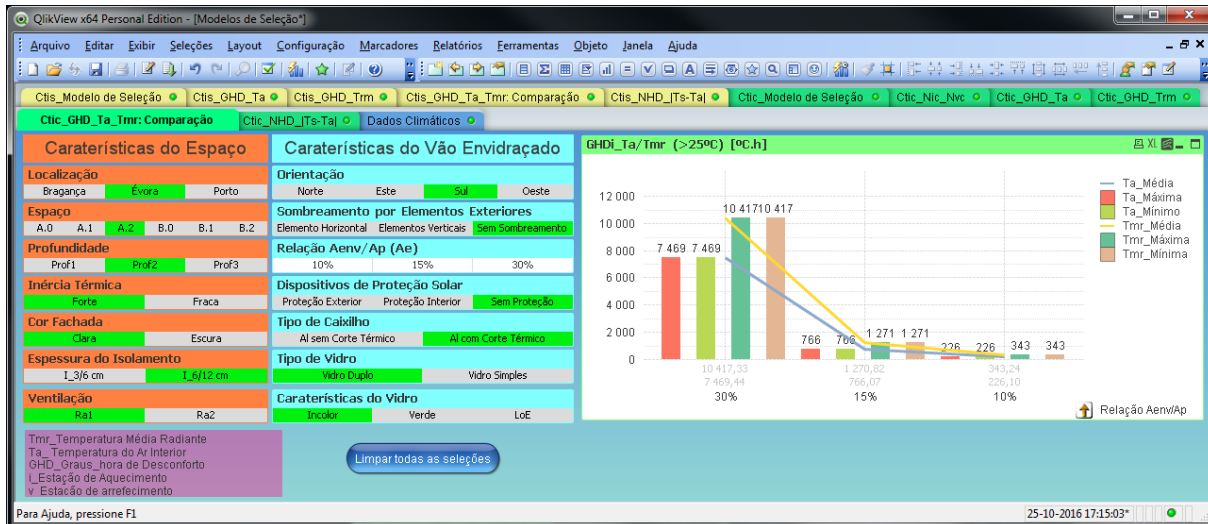


Fig.D.14. – Pasta: Ctic\_GHD-Ta\_Tmr: Comparação

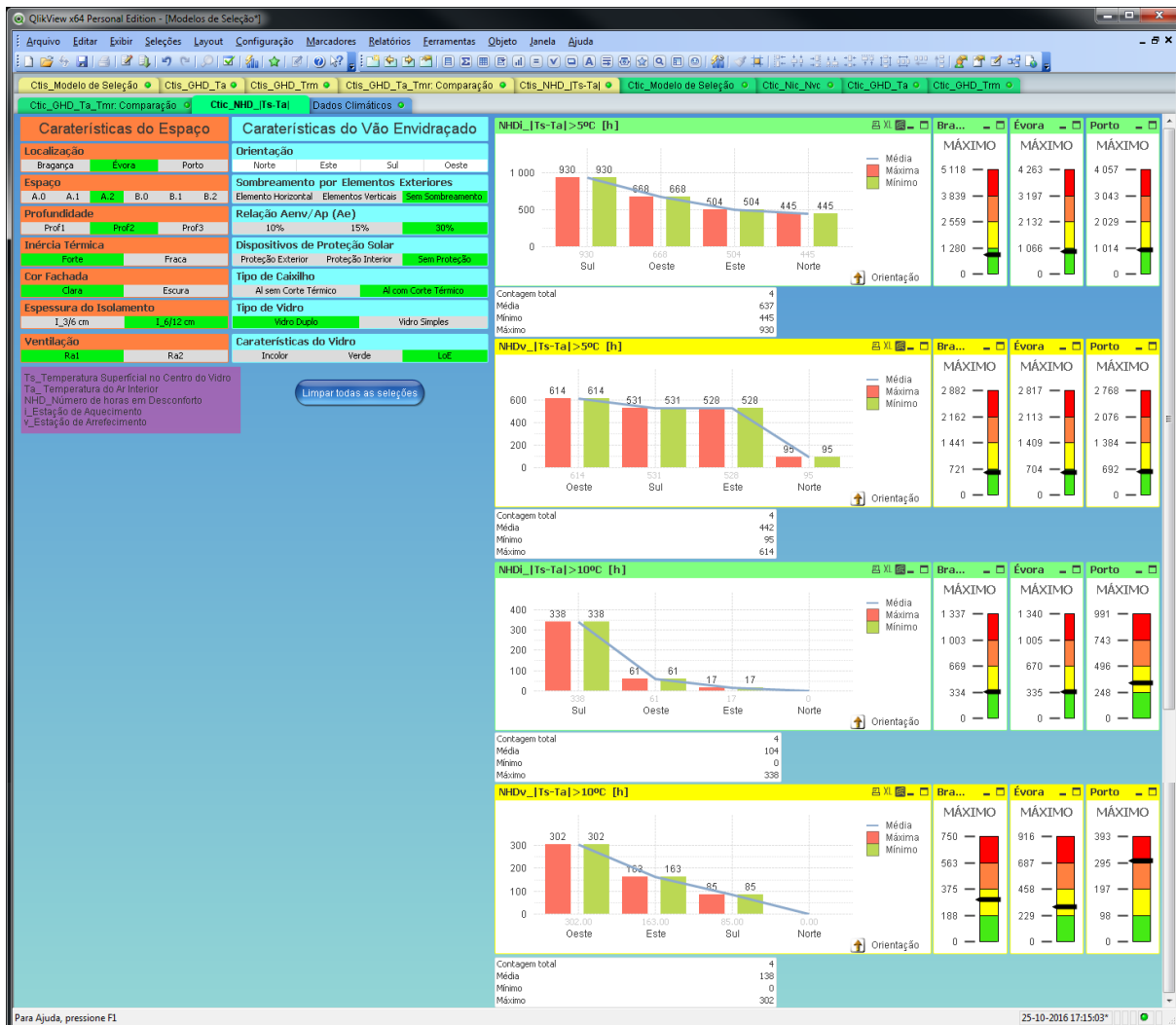


Fig.D.15. – Pasta: Ctic\_NHD\_|Ts-Ta|

## D.4. – DADOS CLIMÁTICOS

Para se poder consultar os dados climáticos, foi criada a pasta apresentada na figura D.16.

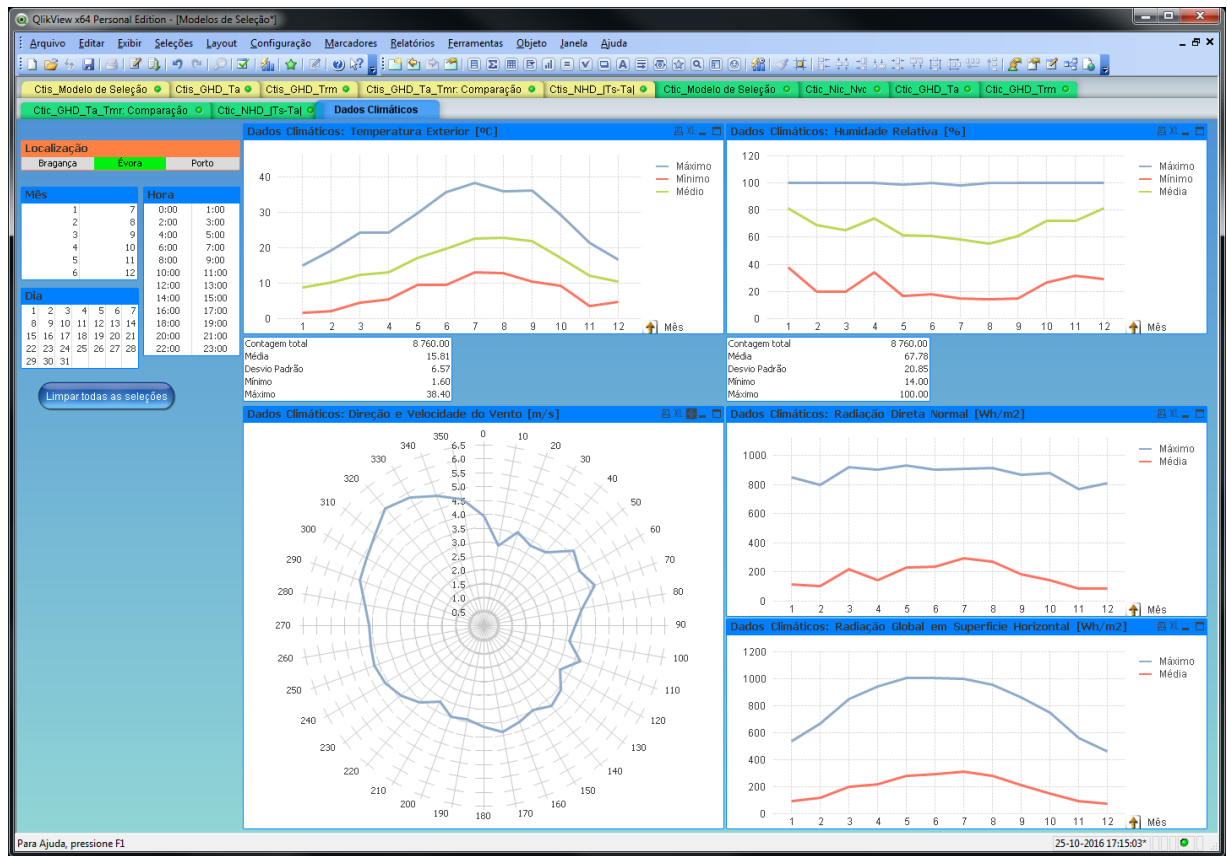


Fig.D.16. – Pasta: Dados Climáticos